Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“___“ _____2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему
“Розроблення та комп’ютерне моделювання системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» із застосуванням скалярного керування для приводу вентилятора”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____ Михайло ІВАНОВ
«____»_____2025 р.
Керівник роботи
кандидат технічних наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
«_____»_____2025 р.
Рецензент _____
_____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *будівництва, транспорту та енергетики*
Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*
Галузь знань *14 Електрична інженерія*
Спеціальність *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*
Освітньо-професійна програма *Електротехнічні системи електроспоживання*

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри
_____ *Плєшков П.Г.*
«___»_____2025 р.

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

Іванова Михайла Сергійовича
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Розроблення та комп'ютерне моделювання системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» із застосуванням скалярного керування для приводу вентилятора*
Development and computer modeling of the "Frequency converter – asynchronous motor" system using scalar control for fan drive

2. Керівник роботи (проекту) *Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук., доц.*
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту *03.12.2025 р*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) *Мета роботи полягає у покращенні динамічних характеристик асинхронного електроприводу вентилятора та зниженні пускових навантажень шляхом розробки імітаційної моделі системи скалярного керування та дослідження перехідних процесів. Завдання роботи: 1. Провести аналіз сучасного стану систем електроприводу турбомеханізмів та обґрунтувати доцільність використання системи «Перетворювач частоти – Асинхронний двигун» (ПЧ-АД) зі скалярним керуванням для вентиляційного навантаження. 2. Здійснити теоретичне дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі частоти. 3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель замкненої системи керування ПЧ-АД. 4. Дослідити перехідні процеси в розробленій моделі (пуск, регулювання швидкості) та проаналізувати енергетичні показники приводу.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	*к.т.н, доц. Савеленко І.В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*6.10.2025*	
2	*Аналітичний огляд систем асинхронного електропривода зі скалярним керуванням*	*23.10.2025*	
3	*Теоретичне дослідження частотно-регульованого асинхронного приводу систем вентиляції*	*5.11.2025*	
4	*Імітаційне моделювання та аналіз динаміки електроприводу системи вентиляції*	*15.11.2025*	
5	*Охорона праці*	*20.11.2025*	
6	*Висновки*	*25.12.2025*	
7	*Оформлення пояснювальної записки КР*	*29.12.2025*	
8	*Оформлення презентаційної частини КР*	*2.12.2025*	

Дата видачі завдання
«____» _____2025 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання
«____» _____2025 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Іванов М. С. Розроблення та комп'ютерне моделювання системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» із застосуванням скалярного керування для приводу вентилятора

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2025 р.

Магістерська робота присвячена вирішенню актуального завдання підвищення енергоефективності та надійності промислових вентиляційних систем шляхом впровадження частотно-регульованого електроприводу.

В роботі проведено аналіз методів керування асинхронним двигуном та обґрунтовано доцільність використання скалярного методу з квадратичною залежністю напруги від частоти для навантажень вентиляторного типу.

Розроблено комплексну імітаційну модель системи «Випрямляч – Інвертор – Асинхронний двигун – Вентилятор» у середовищі MATLAB Simulink. Модель враховує нелінійність напівпровідникових елементів, дискретність ШІМ-сигналів та аеродинамічні характеристики навантаження.

За результатами моделювання доведено переваги частотного пуску над прямим підключенням до мережі. Встановлено, що застосування розробленої системи дозволяє знизити пускові струми у 4,2 раза (з 155 А до 37,5 А) та зменшити пікові динамічні моменти у 4,7 раза (з 280 Н·м до 60 Н·м). Це сприяє усуненню просадок напруги в мережі та подовженню ресурсу механічного обладнання. Розглянуто питання охорони праці та електробезпеки при експлуатації частотних перетворювачів.

Ключові слова: асинхронний двигун, перетворювач частоти, скалярне керування, вентилятор, MATLAB Simulink, енергоефективність, плавний пуск, перехідні процеси.

THE SUMMARY

Ivanov M. S. Development and computer modeling of the “Frequency converter – asynchronous motor” system using scalar control for fan drive

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – " Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2025

The master's thesis is devoted to solving the urgent problem of improving the energy efficiency and reliability of industrial ventilation systems by implementing a variable frequency drive (VFD).

The thesis analyzes methods of induction motor control and substantiates the feasibility of using the scalar control method with a quadratic dependence of voltage on frequency for fan-type loads.

A complex simulation model of the "Rectifier – Inverter – Induction Motor – Fan" system has been developed in the MATLAB Simulink environment. The model takes into account the nonlinearity of semiconductor elements, the discrete nature of PWM signals, and the aerodynamic characteristics of the load.

Based on the simulation results, the advantages of frequency-controlled starting over Direct Online (DOL) starting are proven. It is established that the application of the developed system allows for reducing starting currents by 4.2 times (from 155 A to 37.5 A) and decreasing peak dynamic torques by 4.7 times (from 280 N·m to 60 N·m). This contributes to the elimination of voltage dips in the grid and extends the service life of mechanical equipment. Issues of occupational health and electrical safety during the operation of frequency converters are also considered.

Keywords: induction motor, variable frequency drive (VFD), scalar control, fan, MATLAB Simulink, energy efficiency, soft start, transient processes.

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗІ СКАЛЯРНИМ КЕРУВАННЯМ 12

1.1 Принципи побудови та енергетична ефективність частотно-регульованих електроприводів 12

1.2 Класифікація та особливості застосування асинхронних двигунів у системах вентиляції 14

1.3. Порівняльний аналіз методів керування частотним електроприводом ... 15

1.4 Особливості формування крутного моменту та проблеми регулювання на низьких частотах 27

Висновки до розділу 30

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ 32

2.1 Аналіз електромеханічних процесів та особливостей скалярного керування вентиляторним навантаженням 32

2.2. Імітаційна модель системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» із застосуванням скалярного керування для приводу вентилятора 37

2.2.1. Математична реалізація алгоритму формування керуючих напруг 38

2.2.2. Модель реалізації широтно-імпульсної модуляції та комутації силових ключів 41

2.3 Реалізація алгоритму формування керуючих сигналів 43

2.4 Імітаційна модель силової частини системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» 45

Висновки до розділу 51

РОЗДІЛ 3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ 53

3.1. Методика дослідження динаміки електроприводу системи вентиляції... 53
3.1.1. Моделювання перехідних процесів при прямому пуску від мережі 53
3.1.2. Дослідження динаміки системи «Частотний перетворювач – АД – Вентилятор» у режимі плавного пуску 56
3.1.3. Аналіз роботи комплексної системи «Випрямляч – Інвертор – АД – Вентилятор» 62
3.1.4. Дослідження динаміки на уточненій моделі. 68
3.2. Порівняльний аналіз результатів дослідження 71
Висновки до розділу 72
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ 74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 84

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний виробничий сектор дедалі активніше імплементує стратегії енергоощадження та оптимізації технологічних циклів. Одним із пріоритетних векторів впровадження інновацій залишаються системи примусового повітрообміну, де головним виконавчим механізмом виступають промислові вентилятори. Оскільки вентиляційне обладнання часто працює в безперервному режимі, питання зниження його енергоємності є критичним для рентабельності підприємств.

З метою максимізації ККД подібних установок широко розповсюджена практика інтеграції електроприводів на базі асинхронних машин із застосуванням перетворювачів частоти. При цьому для керування вентиляторним навантаженням найчастіше обирається методику скалярного керування (V/f). Зазначена технологія дозволяє плавно варіювати частоту напруги живлення статора, що гарантує гнучке налаштування продуктивності агрегатів відповідно до поточних потреб. Це не лише оптимізує аеродинамічні процеси, а й суттєво знижує споживання електрики, особливо при роботі на неповну потужність.

Побудова математичних моделей та детальне вивчення перехідних процесів у таких комплексах є вкрай актуальним науково-технічним завданням. Проєктування удосконалених систем регулювання сприятиме:

- підвищенню загальної енергетичної ефективності об'єкта;
- зростанню стійкості обладнання до збурень мережі;
- покращенню адаптивності до динамічних змін режимів роботи.

Отримані результати та розроблені алгоритми можуть бути масштабовані й на суміжні галузі, відкриваючи перспективи для модернізації насосних станцій водопостачання та водовідведення, які мають схожі з вентиляторами механічні характеристики.

Вентиляційні мережі відіграють фундаментальну роль у формуванні безпечного та комфортного мікроклімату як у житловому секторі, так і на

виробничих майданчиках чи в торговельно-розважальних центрах. Їхній функціонал є комплексним і охоплює циркуляцію повітряних мас, очищення від пилу, терморегуляцію та контроль рівня вологості. Безперебійне функціонування цих інженерних комунікацій є вагомим фактором енергобалансу будь-якої споруди, адже на системи клімат-контролю та вентиляції може припадати до 40% від сумарних енерговитрат будівлі.

Новітні підходи до автоматизації, що базуються на тандемі «перетворювач частоти – асинхронний двигун», стали фактичним стандартом для забезпечення гнучкості та надійності експлуатації. У межах даної роботи буде проаналізовано специфіку вентиляційних установок, принципи дії індукційних двигунів та особливості застосування частотних перетворювачів для керування ними.

Впровадження частотного регулювання у системах вентиляції дозволяє досягти прецизійного контролю повітряного потоку, якого неможливо досягти методами дроселювання. Окрім прямої економії ресурсів, використання ПЧ забезпечує «м’який» пуск, що мінімізує ударні навантаження на механічні вузли (підшипники, пасові передачі) та подовжує міжремонтний інтервал. Таким чином, інтеграція цифрових технологій керування є безальтернативним кроком до створення енергоефективної інфраструктури сучасних будівель і промислових об’єктів.

Мета дослідження – здійснити розроблення та комп’ютерне моделювання системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» із застосуванням скалярного керування для приводу вентилятора.

Для реалізації мети дослідження необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Провести аналіз сучасного стану систем електроприводу турбомеханізмів та обґрунтувати доцільність використання системи «Перетворювач частоти – Асинхронний двигун» (ПЧ-АД) зі скалярним керуванням для вентиляційного навантаження.

2. Здійснити теоретичне дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі частоти та розрахувати параметри силового кола для

забезпечення необхідних режимів роботи вентилятора.

3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель замкненої системи керування ПЧ-АД у середовищі MATLAB/Simulink, яка враховує особливості вентиляторного моменту навантаження.

4. Дослідити перехідні процеси в розробленій моделі (пуск, регулювання швидкості) та проаналізувати енергетичні показники приводу при живленні від джерела постійної напруги та через випрямляч.

Об'єкт дослідження – процеси електромеханічного перетворення енергії в частотно-регульованому асинхронному електроприводі відцентрових механізмів (вентиляторів).

Предмет дослідження – закономірності перебігу електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів у системі «перетворювач частоти – асинхронний двигун» при реалізації алгоритмів скалярного керування.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є положення теорії електричних кіл, теорії автоматичного керування та теорії електроприводу. Методи аналізу та синтезу: для дослідження існуючих систем керування та обґрунтування вибору скалярного методу. Методи математичного моделювання: для опису динамічних властивостей асинхронного двигуна в нерухомій та обертовій системах координат, а також для опису вентиляторного навантаження. Комп'ютерне імітаційне моделювання: з використанням програмного середовища MATLAB/Simulink (бібліотека Simscape/Power Systems) для реалізації віртуальної моделі системи та отримання осцилограм струмів, напруг та швидкості.

Наукові результати, отримані в ході роботи полягають в наступному

1. Набуло подальшого розвитку математичне моделювання системи ПЧ-АД зі скалярним керуванням шляхом врахування нелінійної залежності моменту опору від швидкості (вентиляторна характеристика), що дозволило підвищити точність аналізу пускових режимів.

2. Удосконалено методику налаштування параметрів закону керування $U/f = \text{const}$ для забезпечення плавного пуску високоінерційних вентиляційних

механізмів з мінімізацією кидків струму.

Практична цінність роботи. Практична значущість виконаної роботи полягає в наступному:

1. Розроблена в середовищі MATLAB/Simulink імітаційна модель є універсальним інструментом, що дозволяє досліджувати поведінку електроприводу вентилятора на етапі проєктування без необхідності проведення натурних експериментів, що знижує витрати на розробку.

2. Отримані результати моделювання та рекомендації щодо налаштування скалярного керування дозволяють підвищити енергоефективність вентиляційних установок та збільшити термін служби обладнання шляхом зменшення динамічних навантажень при запуску.

Загальна характеристика наукової роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 86 сторінок. Основна частина викладена на 78 сторінках друкованого тексту, містить 52 рисунки. Список використаних джерел містить 26 джерел та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗІ СКАЛЯРНИМ КЕРУВАННЯМ

1.1. Принципи побудови та енергетична ефективність частотно-регульованих електроприводів

Перетворювачі частоти (ПЧ), які в технічній літературі також класифікують як інвертори, представляють собою статичні пристрої силової електроніки. Їхнім основним призначенням є плавне регулювання кутової швидкості ротора та електромагнітного моменту асинхронних електричних машин. Зазначені пристрої є невіддільною складовою сучасних систем автоматизованого керування технологічними процесами (АСК ТП). Сфера їх застосування охоплює широкий спектр механізмів: від відцентрових помп і вентиляційних установок до поршневих компресорів, транспортерних стрічок та складних верстатних ліній як у промисловому секторі, так і в комунальному господарстві.

Функціонування перетворювача базується на принципі подвійного перетворення електричної енергії. Спочатку вхідна напруга мережі промислової частоти (50 Гц) трансформується у постійну за допомогою випрямляча та згладжується у ланці постійного струму. На наступному етапі відбувається інвертування – формування вихідної змінної напруги з необхідною амплітудою та частотою. Для цього зазвичай використовується метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), який дозволяє формувати синусоїдальний струм у обмотках статора. Такий алгоритм роботи дає можливість здійснювати безступеневе керування обертами валу в широкому діапазоні: від повного зупину до розгону понад номінальну швидкість.

Процес інтеграції ПЧ у виробничу лінію вимагає ретельного інжинірингу. Критично важливим є узгодження характеристик перетворювача з параметрами електродвигуна, а саме: номінальною потужністю, класом

напруги, типом навантаження (активне чи реактивне) та необхідним діапазоном регулювання. Окрім цього, налаштування ПЧ передбачає введення параметрів схеми заміщення двигуна, вибір часу розгону/гальмування та конфігурацію захисних функцій, що гарантує безаварійну експлуатацію комплексу.

Впровадження частотно-регульованого електроприводу надає низку вагомих техніко-економічних переваг:

1. Мінімізація витрат електроенергії. Це є ключовим фактором для механізмів із вентиляторною характеристикою навантаження (помпи, вентилятори). Для таких агрегатів споживана потужність пропорційна кубу швидкості обертання $P \sim \omega^3$. Отже, навіть незначне зниження швидкості (наприклад, на 20%) призводить до зменшення енергоспоживання майже вдвічі, що суттєво підвищує загальний ККД системи.

2. Висока точність регулювання. Сучасні ПЧ забезпечують підтримку заданої швидкості з мінімальною похибкою, а також дозволяють реалізовувати складні алгоритми керування (наприклад, ПІД-регулювання) за сигналами від зовнішніх датчиків тиску, температури або витрати. Це дозволяє оптимізувати технологічний процес та уникнути перехідних режимів, шкідливих для механіки.

3. Подовження ресурсу обладнання. Використання перетворювачів дозволяє обмежити пускові струми, які при прямому пуску від мережі можуть перевищувати номінальні значення у 5–7 разів. Зниження електродинамічних зусиль на обмотки двигуна та зменшення механічних ударів на редуктори і підшипники сприяє значному збільшенню міжремонтного інтервалу.

4. Комплексний захист електроприводу. ПЧ виконує функції інтелектуального захисту, запобігаючи аваріям у випадках короткого замикання, обриву фази, перекосу фаз, неприпустимого зниження або підвищення напруги мережі, а також теплового перевантаження двигуна.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що частотні перетворювачі не лише покращують динамічні властивості електроприводу, але є потужним

інструментом ресурсозбереження та підвищення надійності промислових активів.

1.2 Класифікація та особливості застосування асинхронних двигунів у системах вентиляції

Універсальність сучасних частотних перетворювачів дозволяє їм ефективно взаємодіяти з широким спектром електричних машин, адаптуючи алгоритми керування під конкретну електромагнітну схему та конструкцію двигуна. Залежно від архітектури виконавчого механізму, виділяють наступні основні групи двигунів, що працюють у тандемі з ПЧ:

1. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (IM – Induction Motors) - це найбільш масовий клас електричних машин, що домінує у промисловому секторі завдяки своїй надійності, низькій собівартості та відсутності щітково-колекторного вузла. Перетворювачі частоти є оптимальним рішенням для керування такими агрегатами, оскільки дозволяють нівелювати головний недолік асинхронних машин – високі пускові струми та складність регулювання обертів. У системах із насосами та вентиляторами частотне регулювання дозволяє підтримувати постійне співвідношення напруги до частоти (U/f = const), що забезпечує стабільний магнітний потік і високий ККД у всьому робочому діапазоні.

2. Асинхронні двигуни із зовнішнім ротором – цей специфічний підклас машин набув значного поширення саме у сфері HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Їхня конструктивна особливість полягає в тому, що статор розташований у центрі, а ротор обертається навколо нього, будучи інтегрованим безпосередньо у крильчатку вентилятора. Застосування ПЧ для таких двигунів дозволяє не лише гнучко керувати повітрообміном, але й вирішує проблему охолодження двигуна на низьких обертах, оскільки конструкція забезпечує ефективний тепловідвід. Це робить систему компактною та ідеально збалансованою для осьових та відцентрових

вентиляторів.

3. Синхронні двигуни (зокрема з постійними магнітами – PMSM). На відміну від асинхронних, у цих машинах швидкість обертання ротора жорстко прив’язана до частоти поля статора (відсутнє ковзання). Перетворювачі частоти для синхронних машин забезпечують прецизійне позиціювання та стабільність моменту навіть на нульових швидкостях. Хоча такі рішення частіше зустрічаються у верстатах з ЧПК, робототехніці та конвеєрних лініях, їх використання в енергоефективних системах вентиляції також зростає (клас ефективності IE4/IE5).

1.3. Порівняльний аналіз методів керування частотним електроприводом

Окремим важливим сегментом є автоматизація обладнання, що живиться від побутової мережі. Для керування однофазними асинхронними двигунами (напруга 220 В) розроблено спеціалізовані лінійки частотних перетворювачів, прикладом яких є серія SPLC-NZE (зображена на рис. 1.1).

Рис.1.1. Частотні перетворювачі спеціального призначення серії SPLC-NZE

Ці пристрої, як правило, охоплюють діапазон потужностей від 0,75 кВт до 3,7 кВт і спроєктовані для роботи в умовах обмежених можливостей електромережі. Керування в таких перетворювачах зазвичай реалізується за скалярним алгоритмом (V/f), який є достатнім для вентиляційного навантаження. Специфіка їх роботи полягає в особливому формуванні вихідної напруги, що дозволяє уникнути перегріву пускової обмотки однофазного двигуна та забезпечити плавний розгін без ризику перекидання моменту. Це дозволяє впроваджувати енергоощадні технології навіть на невеликих об'єктах, де відсутнє трифазне електропостачання.

Окремим класом завдань у промисловій автоматизації є експлуатація трифазних асинхронних машин із короткозамкненим ротором в умовах однофазної мережі живлення. Для реалізації такого режиму критично важливою умовою є перекомутація обмоток статора за схемою «трикутник». Це зумовлено тим, що більшість перетворювачів, які живляться від побутової мережі 220 В, на виході формують трифазну систему напруг з лінійним значенням саме 220 В, а не 380 В.

Залежно від архітектури системи керування та технологічних вимог до приводу, реалізуються два фундаментальні алгоритми управління:

1. Скалярний метод (V/f контроль). Цей підхід базується на утриманні постійного співвідношення між напругою та частотою, що дозволяє стабілізувати магнітний потік машини. Метод є оптимальним для об’єктів, де відсутні жорсткі вимоги до швидкодії, а навантаження має прогнозований характер. Найчастіше скалярне керування застосовують для турбомеханізмів (вентиляторів, помп), де момент опору залежить від швидкості, а також для конвеєрів із невисокою динамікою пуску. Головна перевага – простота налаштування та стабільність при роботі з декількома двигунами від одного ПЧ.

2. Векторне керування (Field Oriented Control – FOC). Більш досконалий алгоритм, що передбачає математичне розділення струму статора на дві складові: ту, що створює магнітний потік, і ту, що формує обертовий момент.

Це дозволяє здійснювати незалежне та миттєве керування моментом на валу двигуна. Таке рішення є безальтернативним для систем, що потребують високої точності підтримки швидкості при змінному навантаженні, утримання моменту на низьких обертах або швидкої реакції на збурення (наприклад, у підіймальних механізмах чи складних верстатах).

Ринок силової електроніки пропонує спеціалізовані рішення для обох типів задач, адаптовані під напругу 220 В.

Для базових задач (скалярний режим) – серії перетворювачів SPLC-ESD, SPLC-ESD2 та SPLC-NLP1000 (зображені на рис. 1.2) розроблені спеціально для реалізації алгоритму V/f. Вони є економічно ефективним вибором для систем вентиляції та насосних станцій, забезпечуючи надійний плавний пуск та базове регулювання технологічних параметрів без зайвої складності програмування.

а) б)

в)

Рис. 1.2. Перетворювачі частоти модельних рядів SPLC-ESD, SPLC-ESD2 та SPLC-NLP1000

Для вимогливих систем (векторний режим) - лінійка SPLC-AT20 (рис. 1.2) представляє клас високопродуктивних приводів. Вона підтримує векторний алгоритм керування, що дозволяє не лише прецизійно регулювати швидкість, але й оптимізувати енергетичні показники двигуна у складних динамічних режимах, мінімізуючи похибки та втрати.

Остаточне рішення щодо типу керування – скалярного чи векторного – завжди базується на детальному аналізі технічного завдання та динамічних характеристик навантаження.

У промисловому секторі стандартом де-факто є використання трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, обмотки яких зкомутовані за схемою «зірка» (Y). Таке з'єднання розраховане на лінійну напругу мережі 380–400 В. Інтеграція частотного регулювання для таких машин вимагає врахування не лише методу управління, але й доступних джерел енергії на об'єкті.

Розглянемо типові сценарії підбору обладнання:

1. Адаптація до однофазної мережі (конвертація 1ф 220 В в 3ф 380 В). Існують ситуації, коли на об'єкті наявна лише побутова мережа 220 В, проте необхідно експлуатувати промисловий двигун, розрахований на 380 В (без можливості перемикання в «трикутник» або зі збереженням номінального моменту). Для таких задач розроблено спеціалізовані рішення, наприклад, серію SPLC-NZ2200.

Особливістю цих пристроїв є наявність вбудованого модуля підвищення напруги (активного коректора або помпової схеми) у ланці постійного струму. Це дозволяє генерувати на виході повноцінну трифазну напругу 380 В, живлячись від звичайної розетки, що робить їх унікальним інструментом для малих підприємств та майстерень.

2. Стандартна промислова мережа 380 В (Скалярний режим). Якщо підприємство забезпечене трифазним живленням, а технологічний процес (зокрема, вентиляція чи водопостачання) не вимагає миттєвої реакції на зміну навантаження, оптимальним вибором буде серія SPLC-NLP1000.

Ці перетворювачі реалізують класичний закон керування *U/f = const*. Вони забезпечують плавний розгін механізмів та достатню глибину регулювання швидкості для насосних та вентиляторних агрегатів, залишаючись при цьому економічно вигідним рішенням.

3. Високоточні системи 380 В (Векторний режим). Для механізмів зі змінним моментом інерції, важким пуском або необхідністю підтримки стабільних обертів при скачках навантаження (дробарки, екструдери, ліфти) рекомендовано застосовувати серії SPLC-AT20 або SPLC-NZ8400 (див. рис. 1.3).

Рис. 1.3. Векторні ЧП модельних рядів SPLC-AT20 та SPLC-NZ8400

Завдяки потужним процесорам, ці моделі здатні обчислювати параметри потокозчеплення в реальному часі, забезпечуючи прецизійний контроль крутного моменту та високу енергоефективність системи.ShutterstockОгляд

Незалежно від обраної моделі, функціонал частотно-регульованого приводу (VFD) базується на технології подвійного перетворення енергії. Силова частина пристрою складається з трьох ключових ланок:

- Некерований випрямляч: трансформує вхідну змінну напругу (AC) у пульсуючу постійну.

- Ланка постійного струму (DC-bus): згладжує пульсації за допомогою конденсаторної батареї.

- Інвертор на IGBT-транзисторах: генерує вихідну змінну напругу (AC) необхідної амплітуди та частоти методом широтно-імпульсної модуляції.

Саме цей алгоритм дозволяє адаптувати роботу електродвигуна під поточні потреби виробничого циклу, гарантуючи максимальний ККД установки.

Сучасна силова електроніка пропонує кілька базових алгоритмів управління асинхронними двигунами, вибір яких залежить від жорсткості вимог до динаміки та точності електроприводу.

1. Скалярне керування (V/f control). Цей метод є найбільш розповсюдженим завдяки своїй надійності та простоті реалізації. В його основі лежить принцип підтримки постійного співвідношення між амплітудою напруги статора та її частотою (U/f = const).

Графічно ця залежність (рис. 1.4) демонструє, що зі зміною частоти струму пропорційно змінюється і напруга, що дозволяє утримувати магнітний потік двигуна на номінальному рівні. Скалярні системи зазвичай є розімкненими, тобто не мають зворотного зв'язку за швидкістю.

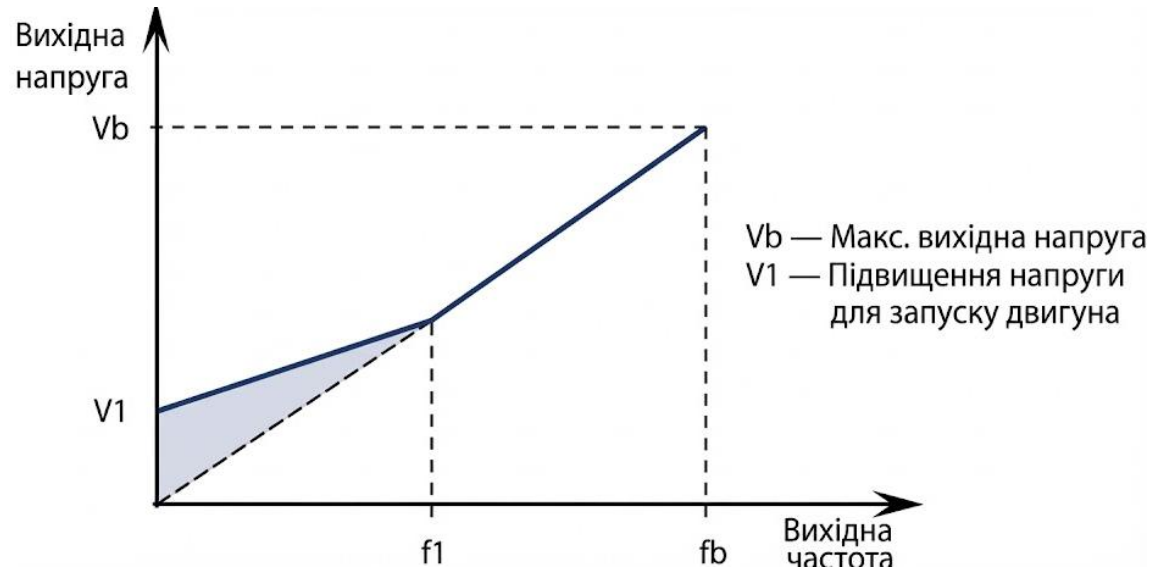


Рис.1.4. Графік залежності V/f частотного перетворювача

Вони ідеально підходять для об'єктів з «вентиляторною» механічною характеристикою, де пускові моменти невеликі, а висока точність підтримки

обертів не вимагається. Головні переваги – низька вартість налаштування та можливість керування групою двигунів від одного перетворювача.

2. Векторне керування (Field-Oriented Control – FOC). Технологія FOC базується на математичному перетворенні трифазної системи струмів у обертову систему координат (d-q). Це дозволяє керувати асинхронним двигуном за принципом двигуна постійного струму, незалежно регулюючи струм намагнічування та моментоутворюючий струм.

Системи FOC можуть бути як з давачем швидкості (енкодером), так і без нього (sensorless). Цей метод забезпечує жорсткі механічні характеристики, повний момент на нульовій швидкості та високу енергоефективність. Векторний режим є безальтернативним для підіймальних кранів, ліфтів та прецизійних верстатів.

3. Пряме керування моментом (Direct Torque Control – DTC) .Інноваційний метод, що відрізняється відсутністю класичного широтно-імпульсного модулятора. Замість цього система використовує гістерезисні регулятори для вибору оптимального вектора напруги з таблиці перемикань.

DTC забезпечує найвищу швидкодію у класі (час реакції на зміну навантаження < 2 мс) та безпосередньо контролює електромагнітний момент і потокозчеплення статора. Це рішення орієнтоване на надскладні промислові завдання з ударними навантаженнями (дробарки, потужні міксери), де критичною є динамічна стійкість приводу.

Підсумовуючи, алгоритм вибору перетворювача базується на фізиці технологічного процесу. Для задач гідродинаміки (переміщення рідин та газів), де навантаження є спокійним і прогнозованим, скалярні перетворювачі є технічно й економічно обґрунтованим стандартом.

Для реалізації таких систем на практиці часто використовуються перевірені серії перетворювачів, які покривають широкий діапазон потужностей:

- Серія SPLC-ESD (Micro-drives): Компактні рішення для малопотужних установок (0,2...1,1 кВт). Оптимальні для локальних вентиляційних

установок, невеликих помп або конвеєрних стрічок у легкій промисловості, де пріоритетом є бюджетність та простота монтажу.

Серія SPLC-NLP1000 (General Purpose): Потужна лінійка промислового класу (до 220 кВт), спроєктована для важких умов експлуатації. Ці пристрої забезпечують ефективне скалярне регулювання для магістральних насосних агрегатів та промислових димососів, гарантуючи плавний пуск та економію електроенергії.

Серія SPLC-AT20 (High Performance): Універсальні флагманські моделі з діапазоном до 280 кВт. Їхня архітектура підтримує подвійний режим роботи: як скалярний, так і повноцінний векторний. Це дозволяє уніфікувати парк обладнання на підприємстві, використовуючи одну модель перетворювача як для простих вентиляторів, так і для складних механізмів з високими вимогами до точності моменту.

Системи частотного регулювання, що базуються на векторному керуванні (Field Oriented Control – FOC), представляють собою еволюційний крок у розвитку електроприводу порівняно з класичними скалярними алгоритмами. Ключова відмінність полягає в тому, що FOC розглядає асинхронний двигун не як «чорну скриньку» зі статичною характеристикою, а як динамічну систему. За допомогою математичних перетворень (Кларка та Парка) трифазний струм статора розкладається на дві незалежні ортогональні складові: одну, що відповідає за створення магнітного потоку (I_d), та іншу, що генерує обертальний момент (I_q).

Такий підхід дозволяє керувати змінним струмом так само ефективно, як і постійним, забезпечуючи миттєву реакцію на зміну навантаження. Це робить векторні приводи безальтернативним рішенням для високотехнологічних галузей: від шпиндельних вузлів верстатів з ЧПК і робототехнічних комплексів до кранового обладнання та поршневих компресорів, де критично важливою є стабільність моменту.

Залежно від наявності зворотного зв’язку, векторні системи класифікують на дві групи:

1. Бездатчикове векторне керування (Sensorless Flux Vector Control – SFVC). У цьому режимі фізичний датчик на валу відсутній. Натомість контролер обчислює положення ротора та швидкість, аналізуючи електричні параметри статора (миттєві значення струмів та напруг). Алгоритм використовує адаптивну математичну модель двигуна (спостерігач стану), щоб відновити відсутні дані. SFVC є стандартом для більшості загальнопромислових механізмів, де потрібна висока динаміка, але немає вимог до позиціювання або роботи на наднизьких (близьких до нульових) швидкостях.

2. Векторне керування у замкнутому контурі (Closed Loop Vector Control – CLVC). Ця конфігурація передбачає встановлення на вал двигуна датчика зворотного зв'язку (інкрементального енкодера або резольвера). Сигнал з датчика передається на плату розширення перетворювача, що дозволяє системі знати реальну швидкість та кут повороту ротора з абсолютною точністю. CLVC забезпечує 100% крутного моменту навіть при нульовій швидкості (утримання вантажу) та гарантує найвищу стабільність обертів.ShutterstockОгляд

Технологія Sensorless FOC базується на безперервному розрахунку електрорушійної сили (ЕРС) обертання. Мікропроцесор перетворювача в реальному часі будує векторну діаграму станів двигуна, оцінюючи параметри ковзання та потокозчеплення. Відмова від фізичних датчиків дає суттєві експлуатаційні переваги:

- зменшується вартість системи та витрати на кабельно-провідникову продукцію.
- зростає надійність (усувається енкодер як потенційно слабка ланка, чутлива до вібрацій та забруднень).
- спрощується монтаж та обслуговування.

Однак слід враховувати фізичні обмеження методу: точність обчислення швидкості знижується на дуже низьких частотах (зазвичай нижче 5 Гц), оскільки амплітуда корисної ЕРС стає співмірною з шумами вимірювання.

Тим не менш, у робочому діапазоні SFVC забезпечує точність підтримки швидкості в межах ±0,5% (проти ±2-3% у скалярному режимі) та час реакції на скидання/накидання навантаження менше ніж 10 мс. Це робить його ідеальним для конвеєрних ліній, екструдерів та вентиляційних систем з високими вимогами до енергоефективності.

Сучасні перетворювачі, такі як серії SPLC-AT20 та SPLC-NZ8400, мають вбудовані алгоритми автотюнінгу, які дозволяють автоматично визначити активний опір та індуктивність обмоток двигуна, що є необхідною умовою для коректної роботи режиму SFVC.

Найвищий рівень продуктивності електроприводу досягається при використанні методу векторного керування зі зворотним зв'язком (Closed Loop Vector Control – CLVC). Фундаментальна відмінність цього підходу від розглянутого раніше бездатчикового режиму полягає в інтеграції у систему вимірювального елемента, який фізично фіксує кінетичні параметри валу.

Роль такого датчика найчастіше виконує інкрементальний енкодер (або резольвер для складних умов), що механічно з'єднується з валом електродвигуна. Цей пристрій генерує серію електричних імпульсів, частота яких пропорційна швидкості обертання, а фазовий зсув дозволяє визначити напрямок руху. Отримана інформація миттєво передається до процесора частотного перетворювача, замикаючи контур регулювання швидкості.

Наявність реальних даних про положення ротора дозволяє мікроконтролеру порівнювати задане значення швидкості з фактичним у кожному такті обчислень. Якщо виникає найменше відхилення (похибка), система миттєво коригує вектор струму статора. Це перетворює звичайний асинхронний двигун на подобу сервоприводу, здатного працювати в чотирьох квадрантах механічної характеристики.

Ключові технічні переваги CLVC:

1. Повний контроль моменту на нульовій швидкості. Система здатна утримувати номінальний крутний момент навіть коли вал нерухомий (режим «серво-утримання»). Це критично важливо для підіймальних кранів, ліфтів та

похилих конвеєрів, де не можна допустити просідання вантажу в момент розгальмовування.

2. Прецизійна стабілізація швидкості. Завдяки енкодеру досягається точність підтримки обертів у діапазоні ±0,02% від номіналу (порівняно з ±0,5% для SFVC).

3. Розширений діапазон регулювання. Електропривод зберігає керованість у співвідношенні швидкостей 1:1000 і більше, що недосяжно для інших методів.

4. Жорсткість механічних характеристик. При різких накидах навантаження (наприклад, вхід різця в деталь або удар дробарки) просідання швидкості компенсується за мілісекунди.

Завдяки своїй винятковій точності, режим CLVC є безальтернативним стандартом для технологічного обладнання високого класу точності:

- поліграфічні машини та лінії виробництва паперу (де потрібен синхронний рух валів);
- протяжні та намотувальні верстати (контроль натягу матеріалу);
- координатні верстати та промислова робототехніка;
- складські штабелери та ліфтове господарство.

Впровадження замкненого векторного керування вимагає доукомплектації частотного перетворювача. Розглянемо це на прикладі серії SPLC-NZ8400. Стандартні клеми перетворювача часто не розраховані на прийом високочастотних імпульсних сигналів від енкодера. Тому для реалізації режиму CLVC необхідна інсталяція спеціалізованої плати розширення (PG-карти), зображеної на рис. 1.5.

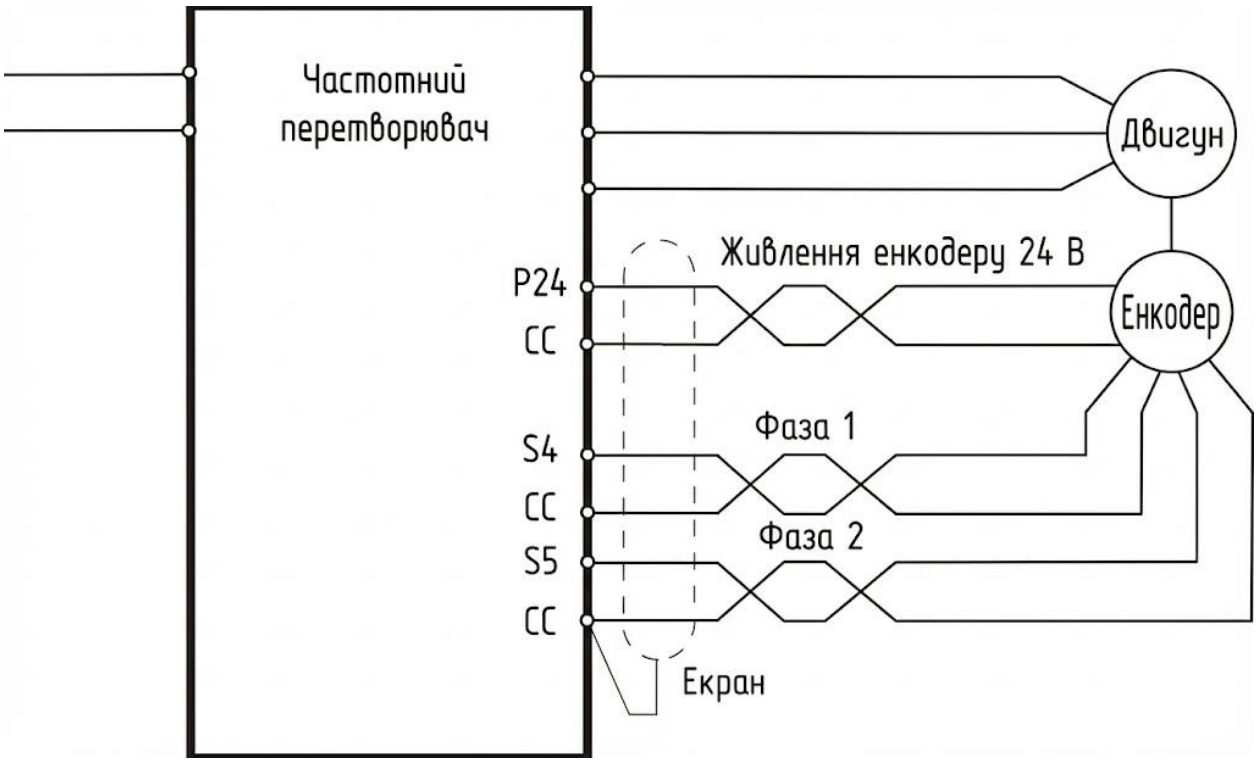


Рис.1.5. Схема приєднання CLVC перетворювача

Ця плата виступає інтерфейсом між датчиком і процесором приводу. Процес модернізації системи виглядає наступним чином:

1. На вал двигуна монтується енкодер.

2. У слот розширення перетворювача встановлюється відповідна PG-карта.

3. У налаштуваннях ПЧ активується режим «Closed Loop» та вводяться параметри енкодера (кількість імпульсів на оберт).

Така конфігурація дозволяє адаптувати систему до найскладніших виробничих завдань, гарантуючи максимальну надійність та продуктивність.

Вершину еволюції сучасних електроприводів займають перетворювачі, побудовані на технології прямого керування моментом (Direct Torque Control – DTC). На відміну від класичних векторних систем, які керують струмами, метод DTC базується на безпосередньому регулюванні електромагнітного моменту та потокозчеплення статора.

Унікальність цієї архітектури полягає у відсутності фіксованого генератора широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Замість цього процесор

використовує адаптивну математичну модель двигуна та блок гістерезисних компараторів. Система аналізує стан двигуна з частотою до 40 кГц і в режимі реального часу обирає оптимальний вектор напруги з таблиці перемикань інвертора. Такий підхід забезпечує феноменальну швидкодію: реакція на зміну навантаження відбувається за 1–2 мілісекунди, що фізично недосяжно для інших методів керування.

Завдяки своїм динамічним характеристикам, приводи класу DTC є безальтернативним вибором для механізмів з ударними навантаженнями та вимогами до надвисокої точності:

- високошвидкісні друкарські лінії (контроль натягу полотна);
- екструдери та міксери (постійність в’язкості суміші);
- текстильне обладнання;
-важкі підіймальні крани та металургійні прокатні стани.

Висока обчислювальна складність методу диктує вартість обладнання, тому його застосування зазвичай обмежується відповідальними вузлами. Прикладом реалізації даної технології є перетворювачі серії SPLC-NZ8400, які гарантують статичну похибку моменту не більше ±5% у розімкненому контурі.

Для специфічних завдань, таких як кранове господарство, розроблено спеціалізовану серію SPLC-CV20. Ці пристрої оптимізовані для роботи з потенціальною енергією вантажу і здатні генерувати пусковий момент на рівні 180% від номіналу (для утримання вантажу при розгальмовуванні). При використанні енкодера точність підтримки моменту в таких системах сягає ±3%.

1.4. Особливості формування крутного моменту та проблеми регулювання на низьких частотах

Слід пам'ятати, що гранична точність системи «ПЧ-двигун» лімітується не лише електронікою, а й конструкцією самої електричної машини. Якщо

технологічний процес вимагає прецизійності, що перевищує можливості асинхронного двигуна, доцільно розглянути перехід на синхронні сервоприводи.

Розуміння природи формування обертального моменту є критичним етапом проєктування електроприводу, яким часто нехтують. У фізиці асинхронної машини електромагнітний момент (M) є функцією магнітного потоку (Φ) та струму ротора.

У системах зі скалярним законом керування базовим принципом є підтримка постійного відношення напруги до частоти ($U / f = const$). Теоретично це має забезпечувати незмінність перевантажувальної здатності двигуна у всьому діапазоні швидкостей. Однак на практиці виникає нелінійність.

Крутний момент асинхронного двигуна наближено пропорційний квадрату напруги живлення ($M \sim U^2$). При зниженні частоти (для зменшення швидкості) перетворювач пропорційно знижує і вихідну напругу. У зоні низьких частот (зазвичай нижче 5-10 Гц) абсолютне значення напруги стає малим, але падіння напруги на активному опорі обмоток статора ($I \cdot R$) залишається незмінним.

Це призводить до того, що електрорушійна сила (ЕРС), яка власне і створює магнітний потік, катастрофічно зменшується. Як наслідок:

1. Магнітне поле двигуна слабшає ("недозібудження").
2. Крутний момент падає значно швидше, ніж знижується частота.
3. Двигун втрачає здатність долати опір навантаження і може зупинитися (перекинутися) навіть при номінальному струмі.

Саме цей фізичний ефект є головним обмеженням скалярних систем і причиною, чому для вентиляторів (де навантаження на низьких обертах мале) цей метод підходить, а для конвеєрів чи ліфтів – ні.

Для часткового вирішення проблеми падіння моменту в скалярних системах застосовують функцію «підвищення напруги» (Torque Boost). Цей алгоритм штучно збільшує амплітуду вихідної напруги в зоні низьких частот,

компенсуючи падіння напруги на активному опорі статора. Це дозволяє уникнути зупинки валу під навантаженням. Проте даний метод має суттєві обмеження: надмірне підвищення напруги може призвести до насичення магнітопроводу (перегріву сталі) при зменшенні навантаження, тому для механізмів з важким пуском або динамічним навантаженням скалярний режим є малоефективним.

У таких випадках безальтернативним рішенням стає векторне керування, яке здатне генерувати номінальний (і навіть пусковий) момент на частотах, близьких до нуля, без ризику перенасичення двигуна. Це досягається не простою зміною напруги, а завдяки глибокому математичному аналізу електромагнітних процесів.

Механізм формування крутного моменту у векторному режимі наступний.

1. Аналіз зворотного зв'язку та моделювання:

Система керування безперервно зчитує миттєві значення фазних струмів статора. На основі цих даних та вбудованої математичної моделі процесор обчислює вектор потокозчеплення ротора. Це дозволяє визначити просторове положення магнітного поля відносно ротора навіть без використання фізичних датчиків (у режимі SFVC).

2. Ортогональне розділення струмів (D-Q декомпозиція). Ключова перевага методу – розділення повного струму статора на дві незалежні складові (за аналогією з двигунами постійного струму):

- струм намагнічування (I_d): відповідає за створення магнітного потоку.

- активний струм (I_q): відповідає безпосередньо за створення обертального моменту.

Це дає можливість контролеру точно дозувати енергію: підтримувати потік стабільним, а момент змінювати миттєво, залежно від потреби.

3. Стабілізація моменту на низьких частотах. Завдяки роздільному керуванню, система може подати максимальний активний струм (I_q) у

обмотки навіть при мінімальній частоті поля. Це гарантує високу перевантажувальну здатність, що є критичним для подолання сил тертя спокою при старті.

Експлуатаційні переваги векторних ПЧ у низькочастотному діапазоні:

- гарантований пусковий момент: можливість отримання 150–200% номінального моменту на частотах 0,5–1 Гц дозволяє ефективно працювати з важкими інерційними механізмами (дробарки, поршневі компресори, кранові візки).

- жорсткість механічної характеристики: векторний алгоритм забезпечує астатичне регулювання – при зміні навантаження на валу швидкість залишається незмінною завдяки миттєвій корекції струму моменту.

- енергетична оптимізація: на відміну від скалярного режиму, де струм часто є надлишковим, векторне керування подає в обмотки рівно стільки активного струму, скільки потрібно для подолання поточного навантаження, що знижує нагрів двигуна на малих обертах.

Висновки до розділу

У цьому розділі проведено аналітичний огляд сучасних систем частотно-регульованого електроприводу, їхніх різновидів та методів керування. На основі аналізу можна сформулювати наступні ключові висновки:

1. Встановлено, що інтеграція перетворювачів частоти в системи з вентиляторним характером навантаження є найбільш ефективним методом енергозбереження. Оскільки споживана потужність вентиляторів залежить від кубічного значення швидкості ($P \sim \omega^3$), перехід від дросельного регулювання до частотного дозволяє знизити енергоспоживання на 20–50% та забезпечити "м’який" пуск, що мінімізує механічний знос обладнання та ударні навантаження на електромережу.

2. Визначено, що вибір між скалярним (U / f) та векторним (FOC/DTC) методами залежить від динамічних вимог технологічного процесу. Скалярне

керування є економічно виправданим та достатнім рішенням для сталізованих процесів вентиляції та водопостачання, де не вимагається висока швидкодія чи точне позиціювання. Векторне керування (як з датчиком, так і без нього) є необхідним для систем зі змінним моментом інерції, важким пуском або потребою в утриманні моменту на наднизьких частотах, забезпечуючи жорсткість механічних характеристик.

3. Виявлено головний недолік скалярних систем – критичне падіння крутного моменту в зоні низьких обертів (внаслідок падіння напруги на активному опорі статора). Доведено, що застосування векторного керування з алгоритмом ортогонального розділення струмів (I_d, I_q) ефективно вирішує цю проблему, дозволяючи отримувати номінальний момент на валу навіть при частотах 0,5–1 Гц без перегріву двигуна, що є недосяжним для класичного методу U/f.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ

2.1 Аналіз електромеханічних процесів та особливостей скалярного керування вентиляторним навантаженням

Електромеханічні комплекси, побудовані на базі тандему «статичний перетворювач частоти – асинхронна машина» (ПЧ-АД), на сьогодні є домінуючим технічним рішенням у сфері автоматизації промислових механізмів. Серед різноманітних методів управління, алгоритм скалярної координації змінних залишається найбільш затребуваним завдяки балансу між простотою налаштування, надійністю апаратної частини та бюджетною доступністю. Ця технологія дозволяє реалізувати плавне регулювання кутової швидкості валу, що робить її ідеальним вибором для об'єктів із «вентиляторною» механічною характеристикою, а також для насосних агрегатів, конвеєрних ліній та іншого загальнопромислового обладнання.

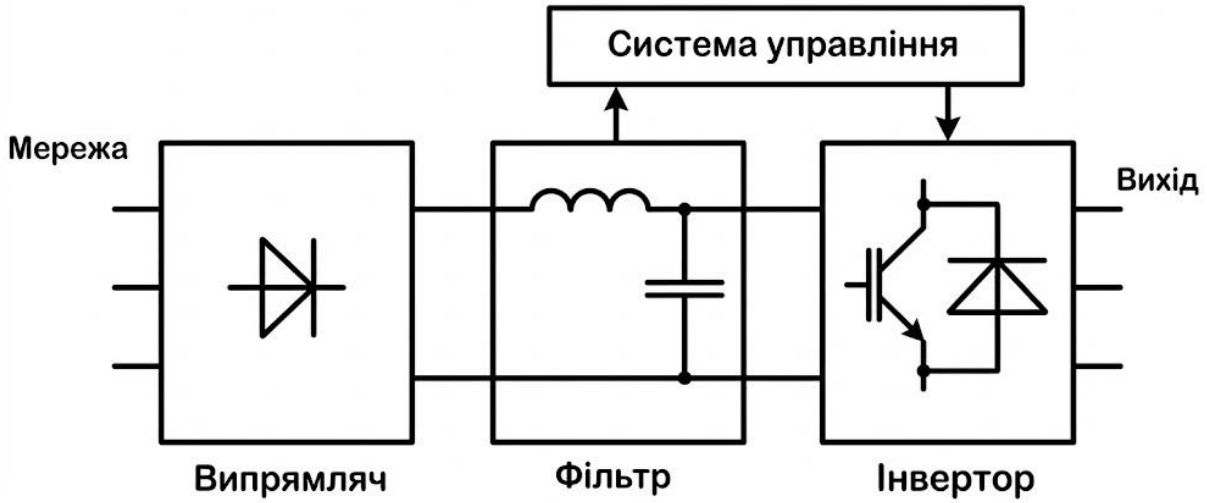


Рис. 2.1. Структурна хема ПЧ-АД

Фундаментальною основою методу є закон пропорційного

регулювання, який передбачає утримання сталого співвідношення між модулем напруги статора та його частотою (U/f = const). Фізична сутність цього принципу випливає з необхідності стабілізації магнітного потоку машини (Ф). Згідно з теорією електричних машин, магнітний потік прямо пропорційний прикладеній напрузі та обернено пропорційний частоті струму. Отже, при зменшенні частоти живлення для зниження обертів вентилятора, система керування повинна синхронно зменшувати амплітуду напруги.

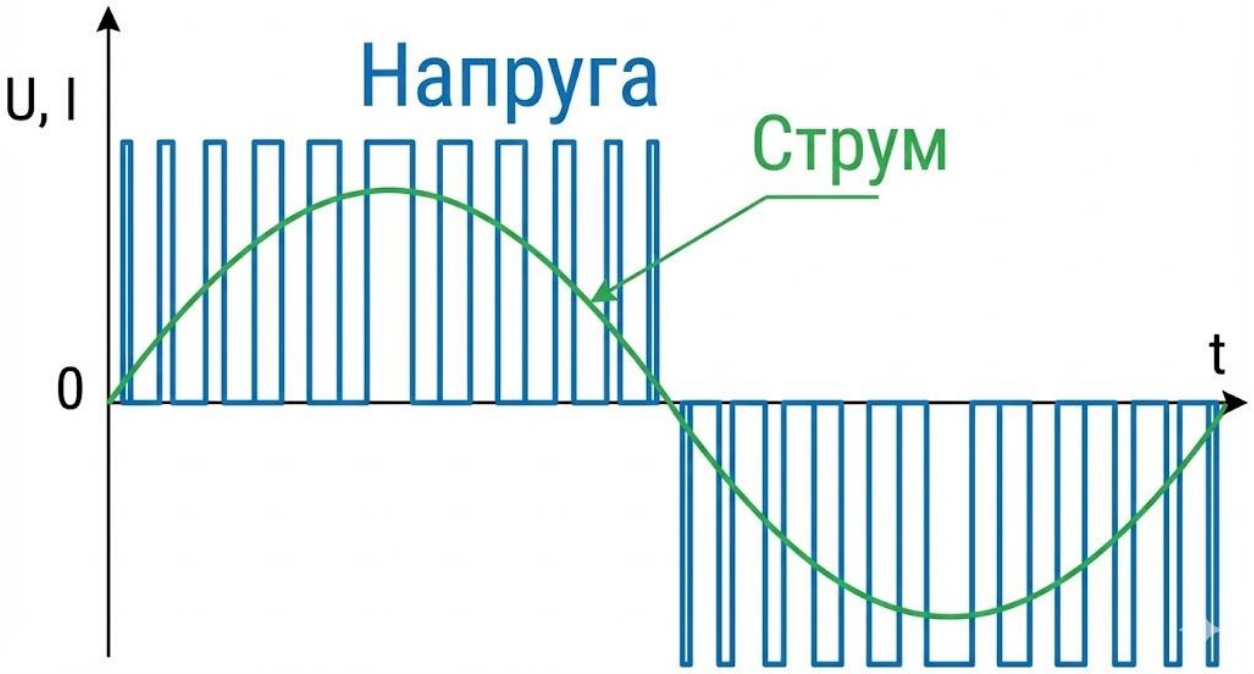


Рис. 2.2. Вихідна напруга ПЧ

Головною метою такої стратегії є забезпечення оптимального режиму намагнічування магнітопроводу. Дотримання закону керування дозволяє уникнути двох критичних режимів:

1. Перенасичення сталі: якщо напруга не знизиться при зменшенні частоти, струм намагнічування різко зросте, що призведе до перегріву двигуна.

2. Недозбудження: якщо напруга знизиться занадто сильно, магнітний потік ослабне, що спричинить критичне падіння обертального моменту та втрату здатності долати опір навантаження.

Таким чином, коректна реалізація скалярного закону гарантує, що асинхронний двигун працюватиме з номінальним перевантажувальним коефіцієнтом у всьому робочому діапазоні швидкостей (до номінальної точки), мінімізуючи при цьому електричні втрати та забезпечуючи задану продуктивність вентиляційної установки.

Функціональну архітектуру досліджуваної системи формують три взаємопов'язані ланки, кожна з яких виконує специфічну роль у процесі електромеханічного перетворення енергії:

1. Напівпровідниковий перетворювач частоти (ПЧ). Цей пристрій виступає посередником між живильною мережею та навантаженням. Його робочий цикл складається з випрямлення вхідної напруги промислової частоти (50 Гц), фільтрації в ланці постійного струму та подальшого інвертування за допомогою IGBT-транзисторів. Кінцевим результатом є формування на клемах статора трифазної системи напруг, амплітуда і частота яких варіюються за заданим алгоритмом мікропроцесорного контролера.

2. Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором (АД). Виступає в ролі виконавчого механізму, що трансформує електричну потужність у механічну роботу обертання крильчатки вентилятора. У системах зі скалярним керуванням швидкість обертання магнітного поля статора (ω_0) лінійно залежить від вихідної частоти інвертора, що описується рівнянням:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

де p – кількість пар полюсів машини.

3. Контур зворотного зв'язку та моніторингу. Хоча класичний скалярний метод вважається розімкненим (без використання енкодера),

сучасні системи вентиляції все ж використовують датчики технологічних параметрів (сенсори тиску, потоку або температури). Сигнал від них надходить на вбудований ПІД-регулятор перетворювача, який автоматично коригує частоту обертання для підтримки заданого мікроклімату.

Базовий принцип функціонування системи ґрунтується на фізичному законі електромагнітної індукції. Електрорушійна сила (ЕРС), що наводиться в обмотках статора, пов'язана з магнітним потоком Φ співвідношенням:

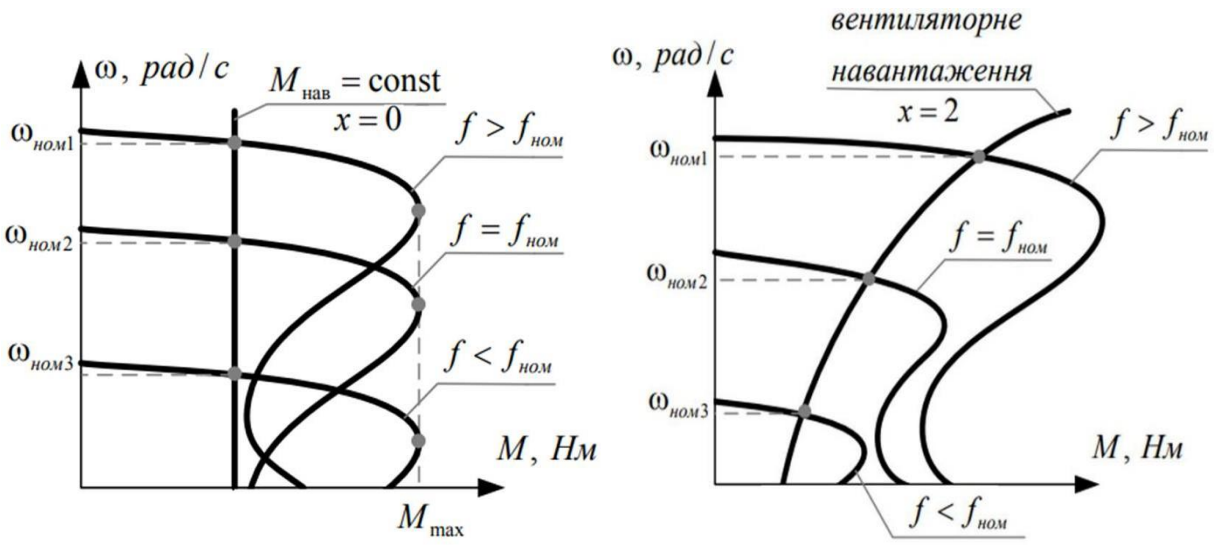
$$E_1 \approx U_1 = 4.44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \Phi$$

де w_1 – кількість витків, k_{w1} – обмотувальний коефіцієнт.

З цієї формули випливає умова скалярного керування: для того, щоб магнітний потік Φ залишався незмінним (номінальним) при зміні швидкості, необхідно підтримувати сталим відношення напруги до частоти:

$$\frac{U_1}{f_1} = \lambda = const$$

На графіках (рис. 2.3) це відображається у вигляді сімейства механічних характеристик, які зміщуються паралельно одна одній уздовж осі швидкості.



а) б)

Рис. 2.3. Механічні характеристики АД у випадку частотного керування:

а) $x = 0$; б)$x = 2$

У роботі вентиляційного електроприводу виділяють дві принципово різні зони:

1. Перша зона (регулювання вниз від номіналу, f < 50 Гц). У цьому діапазоні діє закон постійного моменту (M = const). Напруга змінюється пропорційно частоті. Однак для вентиляторів часто застосовують не лінійну (U/f), а квадратичну залежність ($U / f^2 = const$). Це дозволяє додатково економити енергію, оскільки момент навантаження вентилятора падає квадратично, і подавати повну напругу на низьких обертах немає сенсу.

2. Друга зона (регулювання вгору від номіналу, f > 50 Гц). Тут напруга U_1 досягає свого максимуму (рівного напрузі мережі) і більше зростати не може. При подальшому підвищенні частоти магнітний потік Ф вимушено зменшується обернено пропорційно частоті ($\Phi \sim 1/f$). Цей режим називається режимом ослаблення поля. Важливо враховувати, що крутний момент двигуна в цій зоні падає за квадратичним законом ($M \sim 1/f^2$), що обмежує можливість значного розгону вентилятора понад номінальну швидкість.

Поняття «жорсткості» в контексті скалярного приводу означає здатність двигуна утримувати оберти при зміні моменту опору. Завдяки тому,

що перетворювач частоти компенсує падіння напруги та підтримує частоту стабільною, механічні характеристики в робочій зоні залишаються досить жорсткими. Це забезпечує стабільність аеродинамічних процесів: навіть якщо тиск у вентиляційному каналі зміниться (наприклад, через забруднення фільтрів), швидкість обертання крильчатки зменшиться несуттєво, в межах величини номінального ковзання (s_{nom}).

2.2. Імітаційна модель системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» із застосуванням скалярного керування для приводу вентилятора

Функціональний блок скалярного керування асинхронною машиною (АМ) базується на програмній реалізації закону частотного регулювання, відомого як характеристика V / f (або V / Hz). Структурна схема даного контуру, зображена на рис. 2.4, функціонує за розімкненим принципом (Open Loop), тобто без використання давачів зворотного зв'язку за швидкістю або положенням ротора.

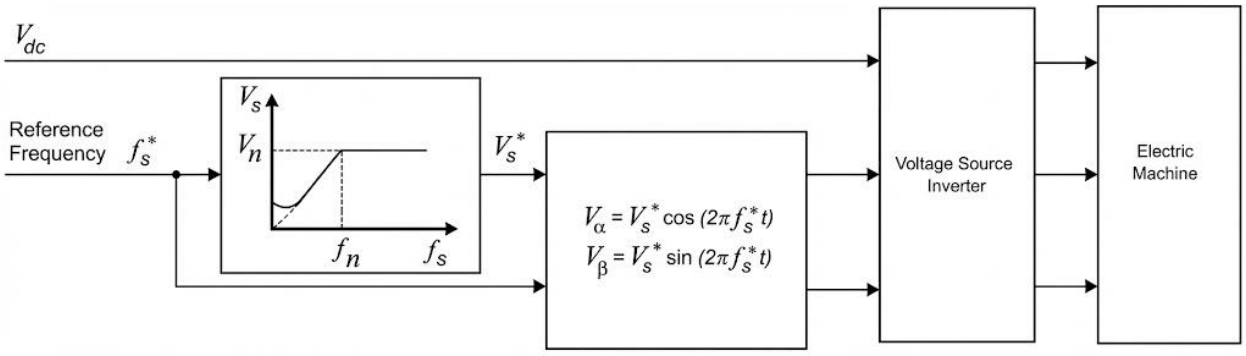


Рис. 2.4. Схема моделі скалярного керування приводом

Основна задача алгоритму полягає у формуванні амплітуди завдання напруги статора $|V_s^*|$ на основі вхідного сигналу завдання частоти f_s^*. Для забезпечення необхідного пускового моменту та компенсації падіння

напруги на активному опорі обмоток, залежність напруги від частоти описується лінійною функцією зі зміщенням. Розрахунок виконується за наступною математичною моделлю:

$$V_s^* = V_{min} + \frac{V_n - V_{min}}{f_n - f_{min}} \cdot (f_s^* - f_{min})$$

де: V_s^* – розрахована амплітуда напруги статора;

V_n – номінальна напруга двигуна (паспортне значення);

V_{min} – напруга початкового зміщення (Boost voltage) для подолання статичного тертя на низьких частотах;

f_n – номінальна частота мережі (зазвичай 50 Гц);

$f_{\min}$ – мінімальна робоча частота.

2.2.1. Математична реалізація алгоритму формування керуючих напруг. Після обчислення амплітуди напруги система повинна сформувати миттєві значення фазних напруг. Для цього спочатку відбувається перехід до двофазної нерухомої системи координат (α,β). Важливим етапом, який неявно присутній в алгоритмі, є інтегрування заданої частоти для отримання поточного кута повороту вектора напруги θ:

$$\theta = \int 2\pi f_s^* \, dt$$

Маючи амплітуду V_s^* та кут θ, модуль обчислює ортогональні проєкції вектора напруги:

$$V_\alpha = V_s^* \cdot \cos(\theta)$$

$$V_\beta = V_s^* \cdot \sin(\theta)$$

На фінальному етапі (схема реалізації на рис. 2.5) застосовується

зворотне перетворення Кларка (Inverse Clarke Transformation).

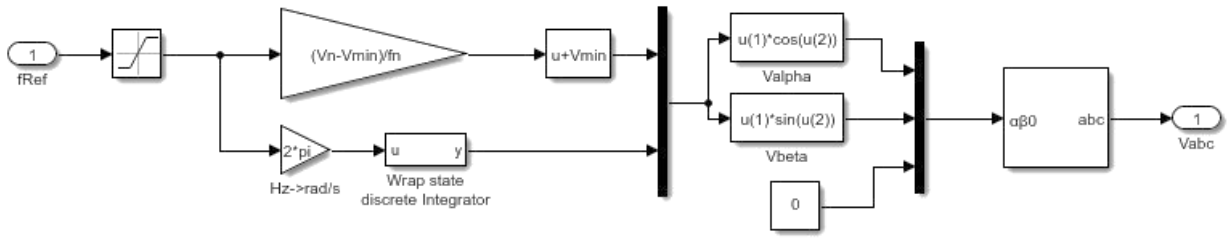


Рис. 2.5. Модель Simulink блоку скалярнаго керування

Ця математична операція дозволяє перейти від двофазної математичної моделі (α,β) до реальних трифазних сигналів керування (a,b,c), що подаються на широтно-імпульсний модулятор:

$$\begin{cases} V_a = V_\alpha \\ V_b = -\frac{1}{2}V_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \\ V_c = -\frac{1}{2}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \end{cases}$$

Узагальнений алгоритм роботи модуля:

1. Завдання частоти: На вхід подається уставка f_s.

2. Розрахунок амплітуди: Частота конвертується в амплітуду напруги згідно з налаштованою кривою V/f.

3. Векторна проєкція: Скалярні величини перетворюються на обертовий вектор у координатах V_α, V_β.

4. Генерація фазних напруг: Виконується координатне перетворення $(\alpha,\beta) \to (a,b,c)$ для формування синусоїдальних сигналів керування інвертором.

Фінальним етапом обробки сигналів у системі керування є перетворення

розрахованих математичних величин у фізичні імпульси для відмикання силових ключів. Цей процес починається з блоку зворотного перетворення Кларка, алгоритм якого візуалізовано на рис. 2.6.

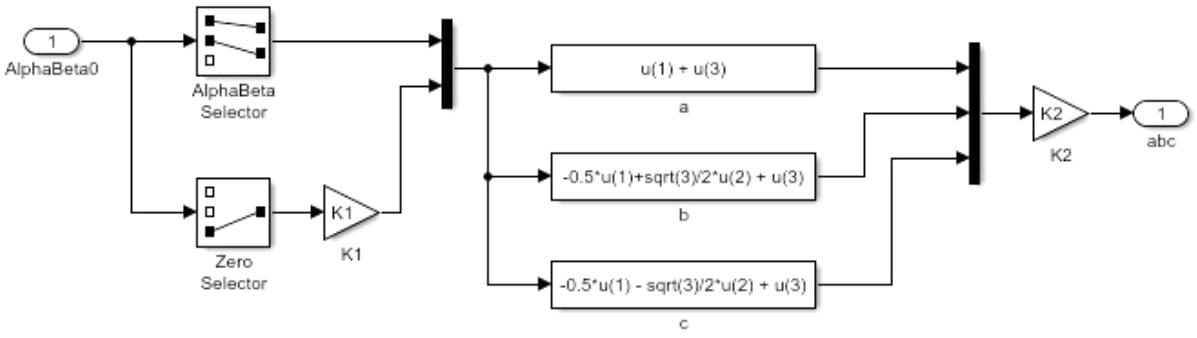


Рис. 2.6. Блок зворотної трансформації Кларка для скалярного управління АМ

Його функція полягає в трансформації вектора напруги з ортогональної двофазної системи координат (V_{α},V_{β}) у трифазну систему (V_a,V_b,V_c), що відповідає реальній архітектурі статора двигуна.

Отримані фазні сигнали слугують завданням для трифазного дворівневого генератора ШІМ. Цей модуль є ключовим елементом системи, оскільки саме він формує логіку комутації силових IGBT-транзисторів автономного інвертора напруги (АІН).

Функціонал генератора базується на порівнянні трьох низькочастотних синусоїдальних сигналів завдання (модулюючих хвиль) з високочастотним опорним сигналом (несучою хвилею). Вхідними параметрами для цього блоку є:

1. Розраховані фазні напруги (V_{ref}).

2. Фактичне значення напруги в ланці постійного струму (U_{DC}). Це необхідно для корекції ширини імпульсів при коливаннях напруги мережі.

На виході формується шість логічних сигналів (по два на кожну фазу: для верхнього та нижнього ключа). Критично важливим аспектом, який

враховує алгоритм генератора, є введення «мертвого часу» (Dead Time). Це коротка затримка (зазвичай 1–3 мкс) між вимкненням верхнього транзистора та увімкненням нижнього, необхідна для запобігання наскрізному короткому замиканню у стійці інвертора.

2.2.2. Модель реалізації широтно-імпульсної модуляції та комутації силових ключів. У сучасних перетворювачах частоти застосовують два основні підходи до формування імпульсів, які мають суттєві відмінності в ефективності:

- Синусоїдальна ШІМ (SPWM): Класичний метод, де кожна фаза модулюється незалежно. Його недоліком є неповне використання напруги джерела живлення.
- Просторово-векторна модуляція (Space Vector Modulation – SVM): Більш прогресивний метод, який розглядає інвертор як єдину систему з 8 можливих станів ключів. Використання SVM дозволяє збільшити амплітуду вихідної напруги на 15% порівняно з SPWM при тій же напрузі шини постійного струму, що знижує теплові втрати та підвищує ККД приводу.

Для генерації імпульсів застосовується компараторна логіка. Блок ШІМ працює за наступним циклічним алгоритмом:

1. Вибірка сигналу: система зчитує миттєве значення модулюючої хвилі (завдання). Дискретизація може бути *симетричною* (вибірка на піках несучої) або *асиметричною*, залежно від налаштувань.

2. Порівняння: відбувається накладання сигналу завдання на трикутну несучу хвилю (частота якої зазвичай становить 2–10 кГц для вентиляторів).

- Комутація: якщо значення завдання більше за значення трикутника → формується активний рівень (ключам подається команда «УВІМК»).
- Якщо значення завдання менше → формується пасивний рівень («ВИМК»).

Метод природної вибірки, що використовується в даному модулі,

визначає моменти перемикання точно в точках перетину синусоїди та трикутника. Це мінімізує гармонічні спотворення струму двигуна, забезпечуючи його плавну роботу та зниження акустичного шуму.

Ключовим критерієм, що визначає ефективність перетворення енергії в ланці «постійний струм – змінний струм», є коефіцієнт амплітудної модуляції (m_a). Цей безрозмірний параметр кількісно описує співвідношення амплітуд керуючого та опорного сигналів і розраховується за формулою:

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{carrier}}$$

де: m_a – коефіцієнт (індекс) амплітудної модуляції;

V_{ref} – амплітуда керуючого синусоїдального сигналу (модулююча хвиля), що відповідає заданій частоті обертання;

$V_{carrier}$ – амплітуда високочастотного трикутного сигналу (несуча хвиля).

Лінійний режим роботи ($0 < m_a \leq 1$). У діапазоні, де амплітуда завдання не перевищує висоту трикутника несучої, система працює в лінійному режимі. Тут амплітуда першої (основної) гармоніки вихідної фазної напруги лінійно залежить від індексу m_a. Це є оптимальним режимом для скалярного керування, оскільки забезпечується мінімальний рівень вищих гармонік у струмі статора, що гарантує плавність ходу двигуна та відсутність додаткових втрат на нагрів заліза.

Режим перемодуляції (Overmodulation, $m_a > 1$). Коли амплітуда керуючого сигналу перевищує пікове значення несучої хвилі, інвертор переходить у нелінійну зону роботи. Фізично це проявляється у явищі, відомому як «випадіння імпульсів» (pulse dropping): у моменти проходження синусоїдою своїх піків перетини з трикутною хвилею зникають, і вихідна напруга інвертора фіксується («притискається») до рівнів позитивної ($+V_{DC}$) або негативної ($-V_{DC}$) шини постійного струму на тривалий час.

Цей режим має двоїстий вплив на систему. Позитивний аспект: дозволяє підвищити діюче значення вихідної напруги, максимально використовуючи потенціал джерела живлення. При глибокій перемодуляції ($m_a >> 1$) ШІМ-сигнал вироджується у прямокутну форму (six-step operation), що дає максимальну можливу потужність. Негативні наслідки: втрачається лінійність регулювання. У спектрі вихідної напруги з'являються низькочастотні гармоніки (5-та, 7-ма, 11-та), які не пригнічуються індуктивністю статора. Це призводить до:

- появи пульсацій електромагнітного моменту (вібрацій);
- додаткового нагріву обмоток двигуна;
- підвищення струмового навантаження на ключі інвертора.

Тому в прецизійних системах вентиляції роботу в зоні глибокої перемодуляції намагаються обмежувати або використовують спеціальні алгоритми компенсації спотворень.

2.3 Реалізація алгоритму формування керуючих сигналів

Ключовим етапом побудови цифрової моделі є створення підсистеми, що відповідає за логіку комутації силових ключів. На рис. 2.7 представлено блок розрахунку часових інтервалів, який виступає ядром системи модуляції.

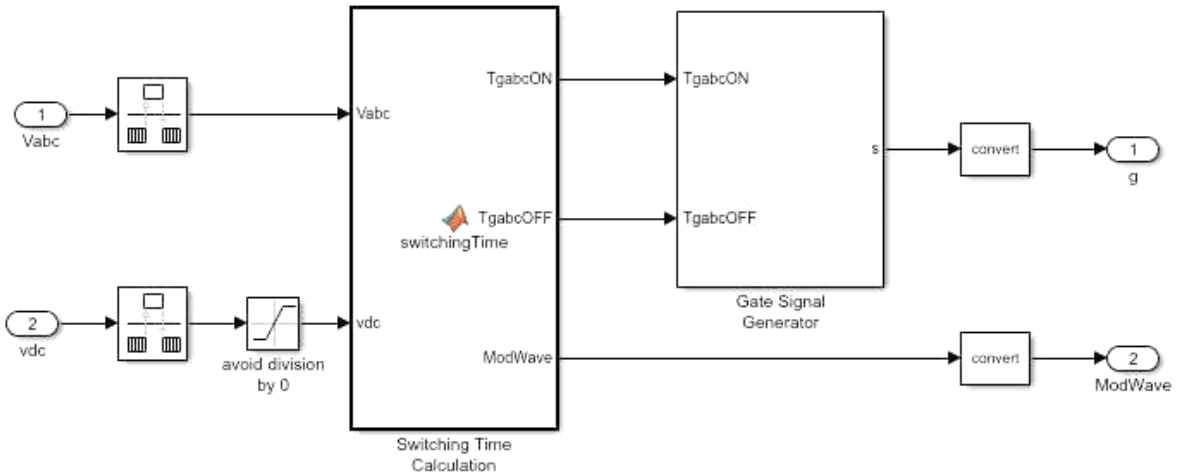


Рис. 2.7. Блок генерації керуючих імпульсів для транзисторів

Вхідними даними для цього модуля слугують два типи сигналів:

1. Сформована система трифазних синусоїдальних напруг завдання (V_{abc}), отримана після координатних перетворень.

2. Актуальне значення напруги ланки постійного струму (V_{dc}), яке надходить від моделі випрямляча або джерела живлення.

Для програмної реалізації алгоритму порівняння використано інтегрований блок MATLAB Function. Це дозволяє прописати гнучкий код на мові високого рівня, який математично точно обчислює моменти перетину модулюючої та несучої хвиль. Такий підхід гарантує прецизійний розрахунок коефіцієнта заповнення (duty cycle) для кожного періоду ШІМ, що є критичним для мінімізації гармонічних спотворень струму статора.

Наступним ланцюгом системи керування є модуль генерації фізичних імпульсів (рис. 2.8).

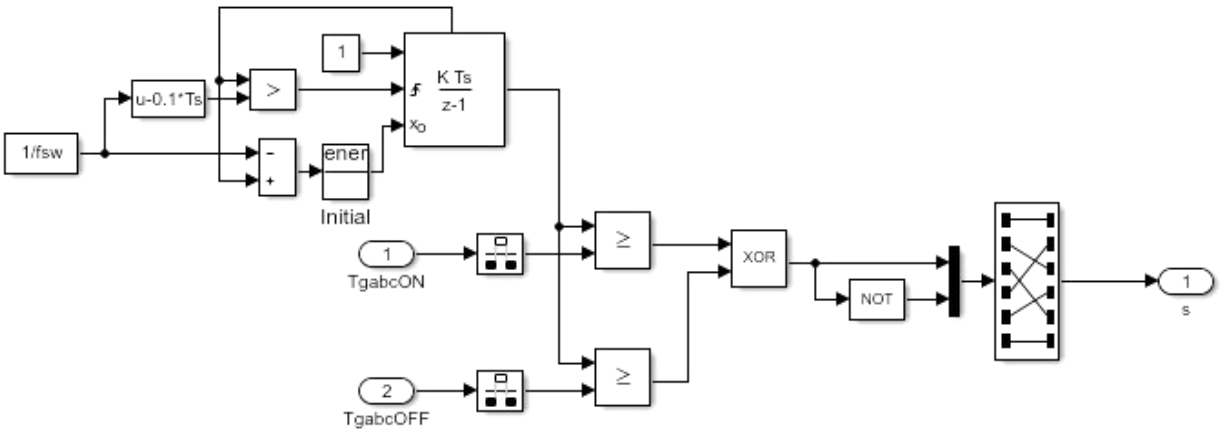


Рис. 2.8. Блок генерації керуючих імпульсів для транзисторів інвертора

Його функція полягає в перетворенні розрахованих часових інтервалів у бінарні логічні сигнали (0/1), які безпосередньо подаються на затвори транзисторів. Цей блок формує шість незалежних каналів керування ($g_1 ... g_6$) – по два для кожної фази інвертора (верхній та нижній ключі). Важливою особливістю даного етапу є програмне введення «мертвого часу», що

запобігає одночасному відмиканню транзисторів однієї стійки.

2.4 Імітаційна модель силової частини системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун»

Енергетичний контур системи відтворюється за допомогою блоку автономного інвертора напруги (рис. 2.9). В якості комутаційних елементів обрано модель IGBT-транзисторів із вбудованими зворотними діодами. Живлення інвертора здійснюється від джерела постійного струму напругою 560 В. Це значення не є випадковим – воно відповідає амплітудному значенню випрямленої напруги стандартної промислової мережі 380 В ($380 \cdot \sqrt{2} \approx 537$ В, з урахуванням запасу – 560 В).

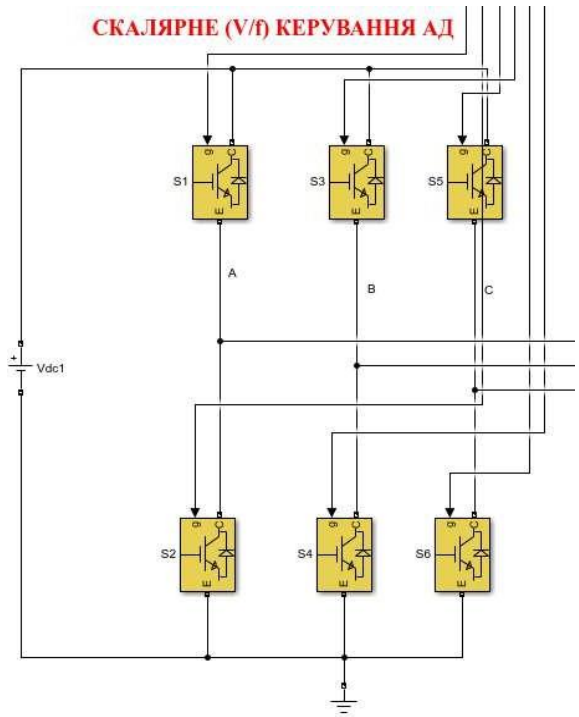


Рис. 2.9. Модель силового інверторного перетворювача

Фінальним елементом схеми є динамічна модель асинхронного двигуна (рис. 2.10).

У середовищі Simulink використано стандартний блок *Asynchronous*

Machine, параметри якого налаштовано відповідно до паспортних даних реального вентиляторного двигуна.

Особливістю розробленої схеми є гнучкість налаштування механічного навантаження. Модель дозволяє досліджувати два режими:

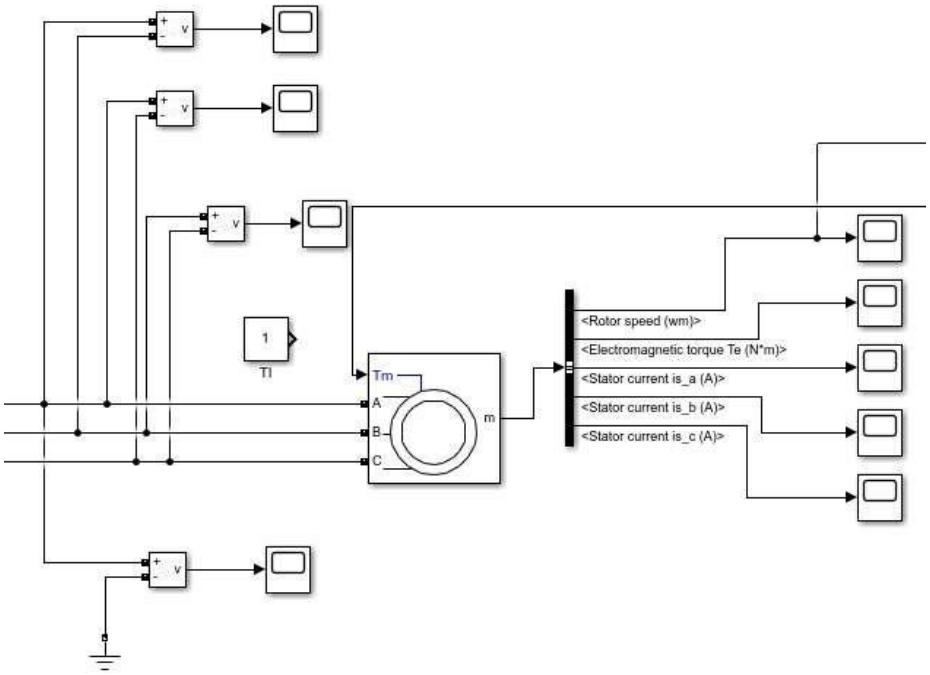


Рис. 2.10. Модель Simulink асинхронного двигуна

1. Статичне навантаження: Подача постійного моменту опору ($M_c = const$) для перевірки пускових характеристик.

2. Вентиляторна характеристика: Підключення блоку, що імітує аеродинамічний опір крильчатки. У цьому випадку момент опору задається за квадратичним законом ($M_c \sim \omega^2$), що дозволяє максимально наблизити симуляцію до реальних умов експлуатації систем промислової вентиляції.

Для проведення адекватного експерименту критично важливою є коректна ідентифікація параметрів електричної машини. У середовищі Simulink це реалізується через налаштування діалогових вікон блоку Asynchronous Machine, представлених на рис. 2.11 та 2.12.

З бібліотеки попередньо встановлених моделей (Preset models) було обрано асинхронний двигун номінальною потужністю 7,5 кВт (400 В, 50 Гц,

1440 об/хв). Такий вибір потужності є типовим для промислових вентиляційних установок середньої продуктивності та дозволяє дослідити динаміку приводу з урахуванням реальних значень активних опорів та індуктивностей обмоток.

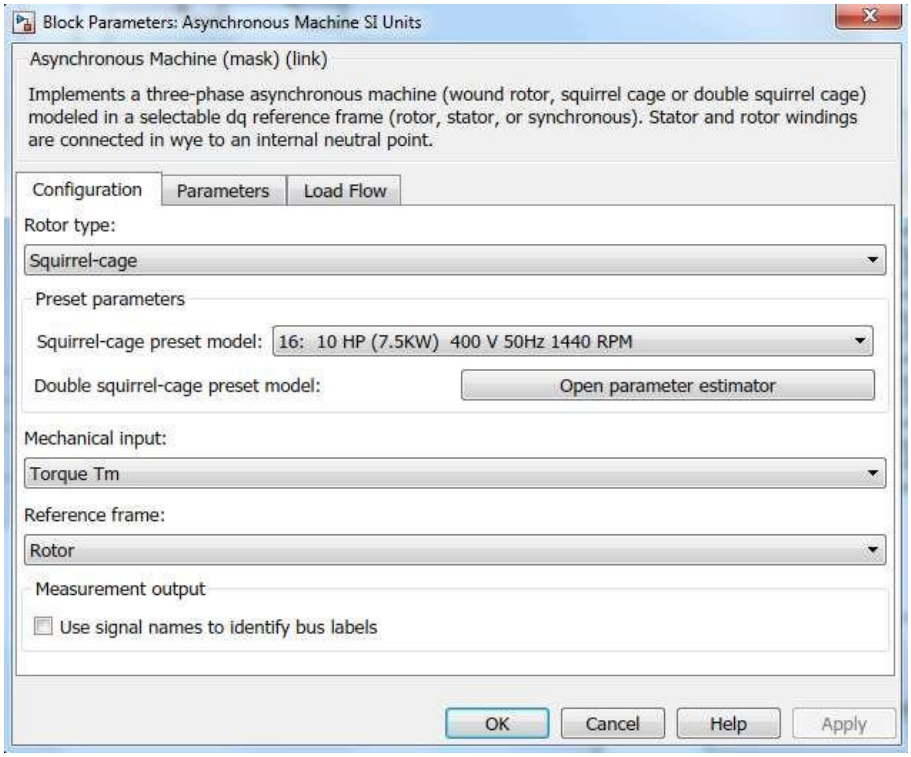


Рис. 2.11. Вікно конфігурації моделі Simulink АД

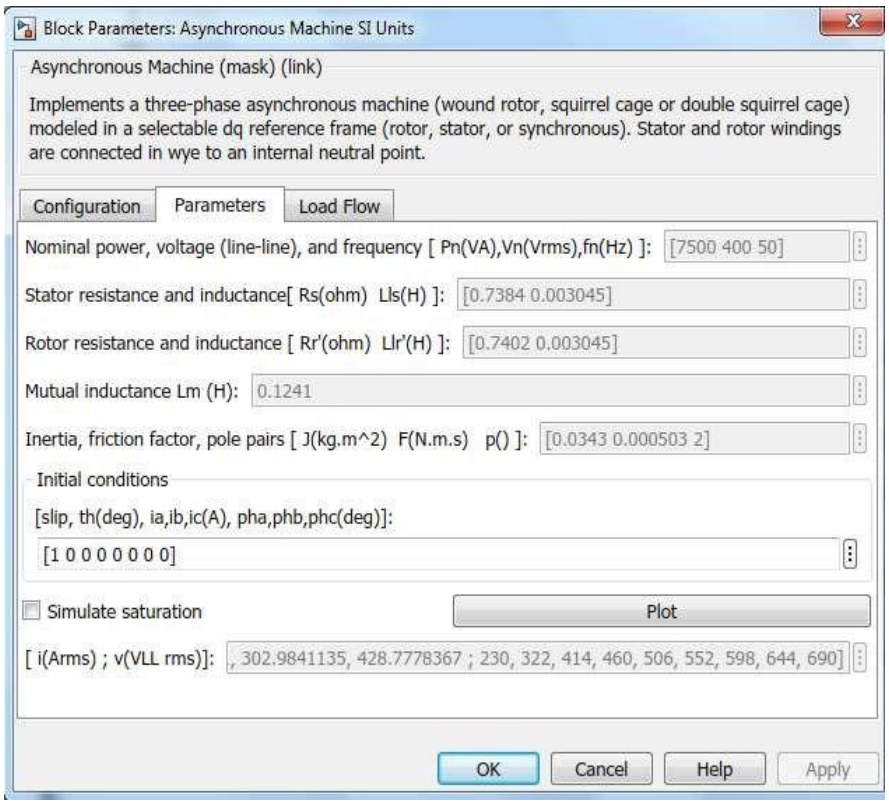


Рис. 2.12. Вікно параметрів моделі Simulink АД

Особливістю досліджуваної системи є залежність моменту опору від кутової швидкості. Базуючись на законах аеродинамічної подібності (рівняннях Ейлера для турбомашин), основні технологічні змінні вентилятора – продуктивність (Q), напір (H) та споживана потужність (N) – пов'язані з частотою обертання валу (n) наступними співвідношеннями:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{n_1}{n_0}; \quad \frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_0} = \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^3$$

де індекс «0» позначає номінальні параметри, а «1» – поточні.

Ключовим для електроприводу є третє рівняння, яке демонструє кубічну залежність потужності від швидкості ($P \sim \omega^3$). Саме ця фізична властивість забезпечує значний потенціал енергозбереження при зниженні обертів навіть на 10–20%. Графічна інтерпретація цієї залежності відображена на рис. 2.13.

n1 =	N1(n1) =
0	0
100	2.512
200	20.094
300	67.817
400	160.751
500	313.967
600	542.535
700	861.525
800	$1.286 \cdot 10^3$
900	$1.831 \cdot 10^3$
$1 \cdot 10^3$	$2.512 \cdot 10^3$
$1.1 \cdot 10^3$	$3.343 \cdot 10^3$
$1.2 \cdot 10^3$	$4.34 \cdot 10^3$
$1.3 \cdot 10^3$	$5.518 \cdot 10^3$
$1.4 \cdot 10^3$	$6.892 \cdot 10^3$
$1.5 \cdot 10^3$	$8.477 \cdot 10^3$

$n1 := 1440$ $N1(n1) = 7.5 \times 10^3$

Графік, що демонструє цю залежність, наведений на рис. 2.13.

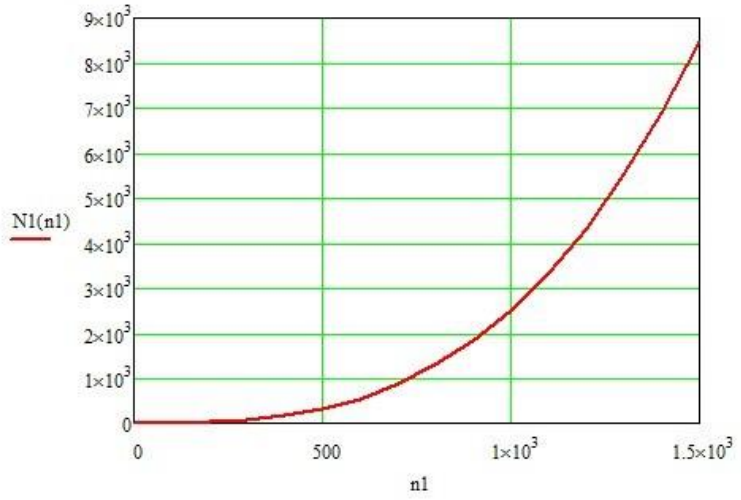


Рис.2.13. Графік залежності $N_1 = f(n)$

Оскільки вхідним параметром для блоку двигуна є момент навантаження (T_m), а не потужність, було розроблено спеціальну підсистему перерахунку (рис. 2.14).

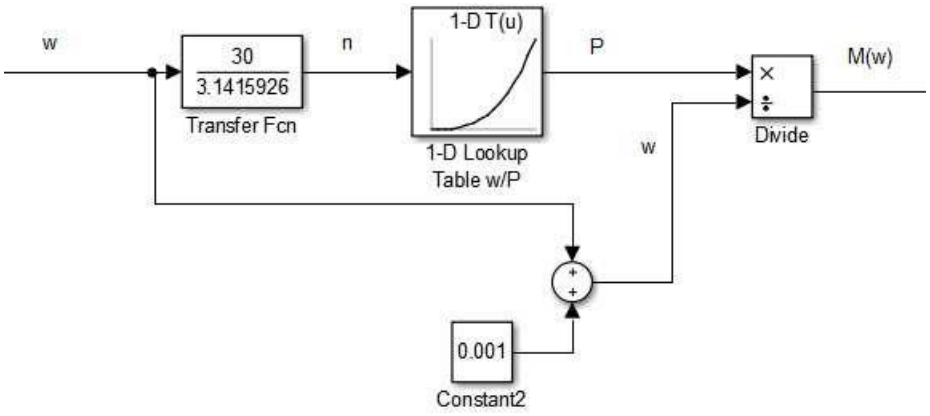


Рис.2.14. Модель Simulink процесу визначення моменту двигуна від вентиляторного навантаження

Логіка її роботи виглядає наступним чином:

1. Нормалізація швидкості: сигнал кутової швидкості ротора (ω_m), що вимірюється в радіанах за секунду (rad/s), конвертується у звичні оберти за хвилину (rpm) або у відносні одиниці.

2. Апроксимація характеристики: Отримане значення швидкості подається на вхід блоку Lookup Table (1-D таблиця пошуку). В цьому блоці затабульовано експериментальну або розрахункову криву потужності вентилятора $N = f(n)$, яка реалізує кубічний закон.

3. Обчислення моменту: На виході таблиці ми отримуємо поточну механічну потужність на валу вентилятора. Для знаходження моменту опору використовується фундаментальна формула механіки:

$$M_{stat} = \frac{P_{mech}}{\omega}$$

Для реалізації цієї операції в схемі використано блок ділення (Divide).

Отриманий сигнал моменту подається на вхід навантаження асинхронного двигуна (Load Torque input). Така структура (рис. 2.15) дозволяє отримати динамічну модель, яка автоматично змінює опір на валу

залежно від поточної швидкості розгону, імітуючи реальний аеродинамічний опір повітряного середовища.

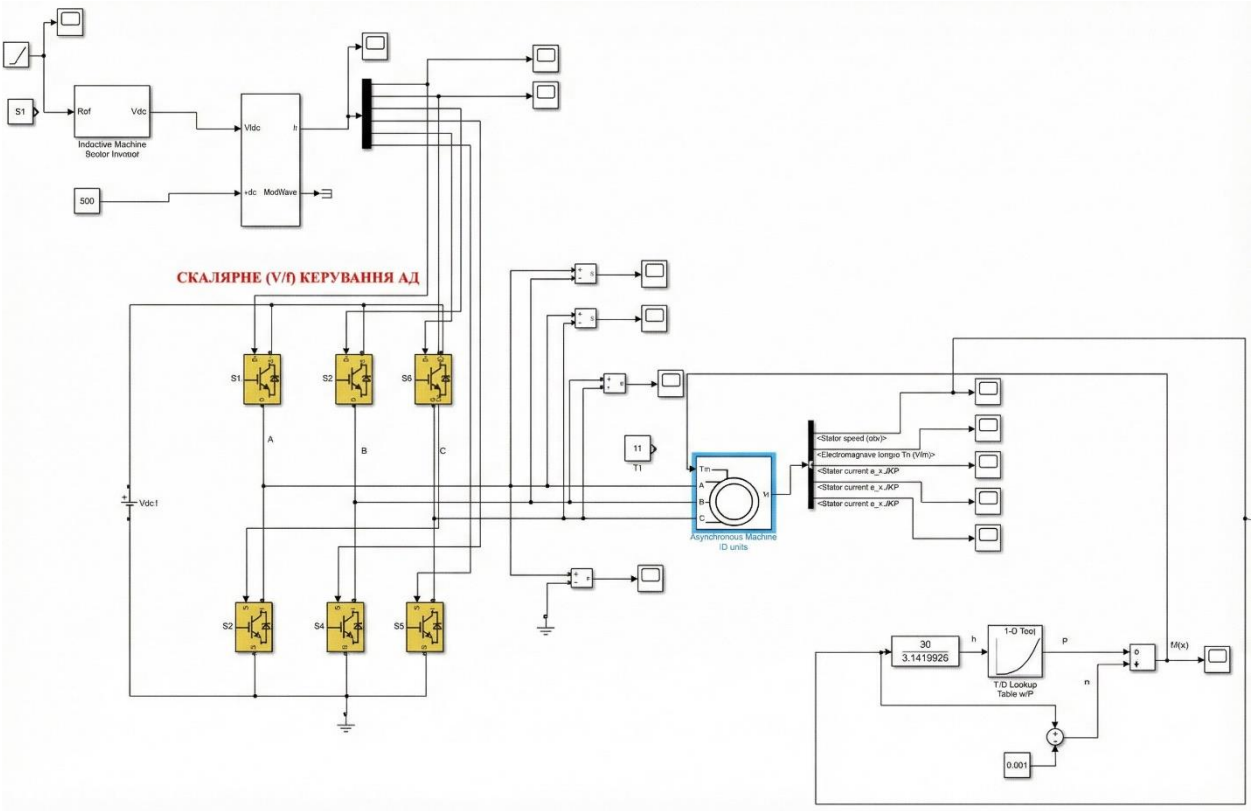


Рис. 2.15. Модель Simulink частотного електропривода вентилятора

Поєднання моделі частотного перетворювача, двигуна 7,5 кВт та блоку вентиляторного навантаження формує цілісну віртуальну лабораторію для дослідження енергетичних процесів та перевірки алгоритмів плавного пуску.

Висновки до розділу

У другому розділі проведено теоретичне дослідження системи частотного керування асинхронним двигуном для вентиляційних установок. На основі аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що для приводу турбомеханізмів (вентиляторів) найбільш енергетично ефективним є застосування модифікованого скалярного закону керування з квадратичною залежністю напруги від

частоти ($U / f^2 = const$). Такий підхід, на відміну від лінійного закону, дозволяє уникнути надлишкового намагнічування двигуна в зоні неповних навантажень, знижуючи електричні втрати та забезпечуючи стабільність магнітного потоку без ризику перенасичення сталі.

2. Сформовано математичний опис розімкненої системи керування, який включає блоки лінійної інтерполяції напруги (з урахуванням V_{min} для компенсації статичного моменту), інтегрування частоти для визначення кута вектора та блок зворотного перетворення Кларка. Доведено, що така структура забезпечує коректне формування трифазної системи керуючих напруг без необхідності використання датчиків зворотного зв'язку, що спрощує та здешевлює систему.

3. Порівняльний аналіз методів широтно-імпульсної модуляції показав переваги використання просторово-векторної модуляції (SVM) над класичною синусоїдальною (SPWM). Застосування SVM дозволяє підвищити коефіцієнт використання напруги ланки постійного струму на 15%, що є критичним для забезпечення номінальної напруги на двигуні при стандартному живленні інвертора. Також наголошено на необхідності апаратного введення «мертвого часу» (Dead Time) для запобігання наскрізним струмам у силових ключах.

4. Визначено, що вихід за межі лінійної зони регулювання (індекс модуляції $m_a > 1$) призводить до режиму перемодуляції. Хоча це дозволяє збільшити вихідну потужність, встановлено, що такий режим супроводжується значним зростанням коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) та появою низькочастотних гармонік, які викликають додатковий нагрів обмоток та пульсації моменту, що є небажаним для довготривалої експлуатації вентиляторів.

РОЗДІЛ 3
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ

3.1. Методика дослідження динаміки електроприводу системи вентиляції

У межах даного розділу магістерської роботи проводиться комплексне дослідження електромеханічних процесів у розробленій віртуальній моделі системи «Перетворювач частоти – Асинхронний двигун» (ПЧ-АД). Симуляція виконується в програмному середовищі MATLAB Simulink, що дозволяє з високою точністю відтворити поведінку обладнання в різних режимах експлуатації: від прямого підключення до мережі до плавного частотного регулювання зі скалярним законом керування при роботі на вентиляторне навантаження.

3.1.1. Моделювання перехідних процесів при прямому пуску від мережі. Перший етап експерименту присвячено дослідженню режиму прямого пуску (Direct Online Start – DOL), за якого обмотки статора комутуються безпосередньо до мережі живлення з номінальною напругою та частотою 50 Гц. Для реалізації цього сценарію було сконфігуровано відповідну імітаційну схему (рис. 3.1).

Метою цього досліду є отримання базових («еталонних») характеристик системи, які виступатимуть точкою відліку для оцінки енергоефективності частотного регулювання. Аналіз некерованого розгону дозволяє виявити слабкі місця традиційних систем електроприводу та кількісно оцінити рівень перевантажень.

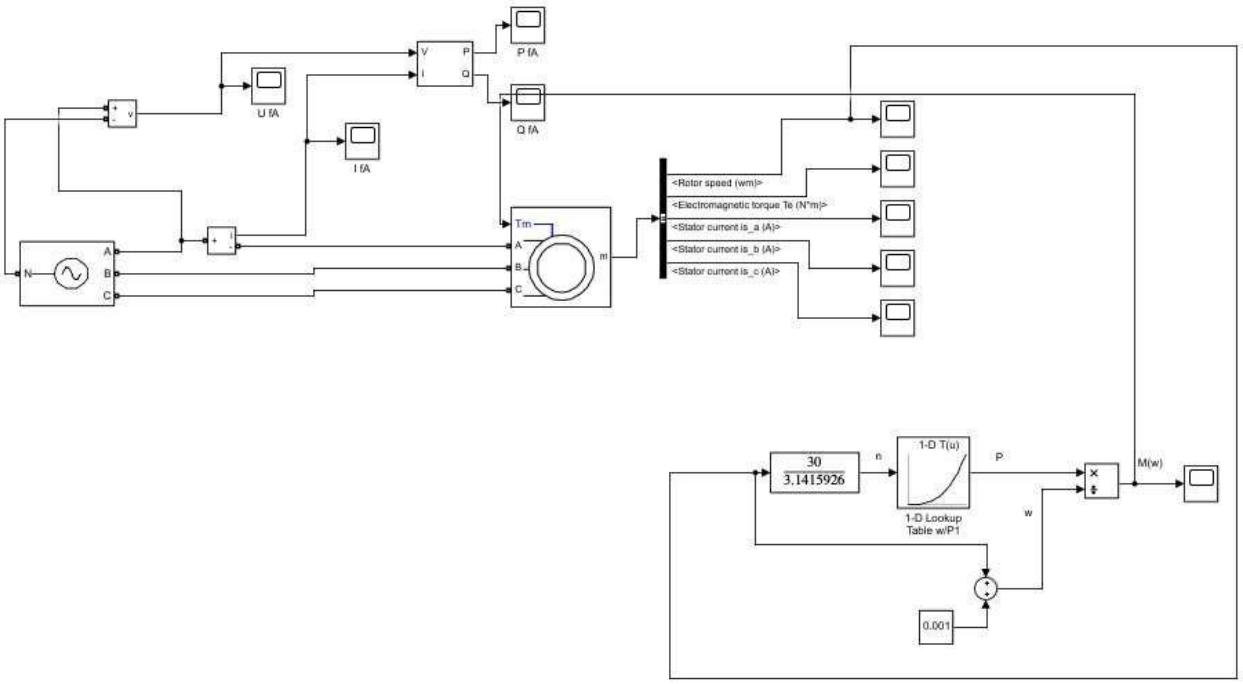


Рис. 3.1. Модель дослідження прямого запуску асинхронного двигуна з вентилятором у середовищі MATLAB

Результати моделювання представлені у вигляді часових діаграм основних координат електроприводу:

1. Динаміка швидкості (рис. 3.2): графік ілюструє процес розгону ротора від нерухомого стану до номінальної кутової швидкості. Характер кривої дозволяє оцінити час розгону та наявність перерегулювання або коливань швидкості при виході на усталений режим роботи вентилятора.

2. Фазний струм статора (рис. 3.3): На діаграмі, що відображає струм фази А, чітко простежується амплітуда пускового кидка. Високе значення струму в початковий момент часу пояснюється тим, що при нерухомому роторі ковзання дорівнює одиниці (s = 1), що призводить до мінімального індуктивного опору машини. Графік дає змогу оцінити тривалість протікання пускових струмів та їхній тепловий вплив на ізоляцію обмоток.

3. Електромагнітний момент (рис. 3.4): Крива зміни крутного моменту демонструє ударний характер навантаження на механічну частину приводу. Аналіз графіку дозволяє визначити кратність пускового моменту відносно номінального та простежити, як двигун долає протидіючий момент

вентилятора (який зростає пропорційно квадрату швидкості) на всіх етапах розгону.

Детальний аналіз отриманих даних свідчить про наявність критичних навантажень на систему при прямому пуску. Зокрема, зафіксовано, що амплітуда струму статора в перехідному режимі сягає пікових значень 155 А, що у 5–7 разів перевищує номінал. Одночасно з цим спостерігається стрибок електромагнітного моменту до рівня 280 Н·м.

Такі значні перевантаження мають деструктивний вплив на обладнання:

- високі пускові струми викликають просадки напруги в мережі живлення та прискорюють термічне старіння ізоляції.
- ударний момент створює надмірні механічні напруження у валу, муфтах та лопатях вентилятора, що скорочує їхній ресурс.

Отримані результати підтверджують нераціональність використання прямого пуску для потужних вентиляційних установок та обґрунтовують необхідність застосування плавного частотного пуску.

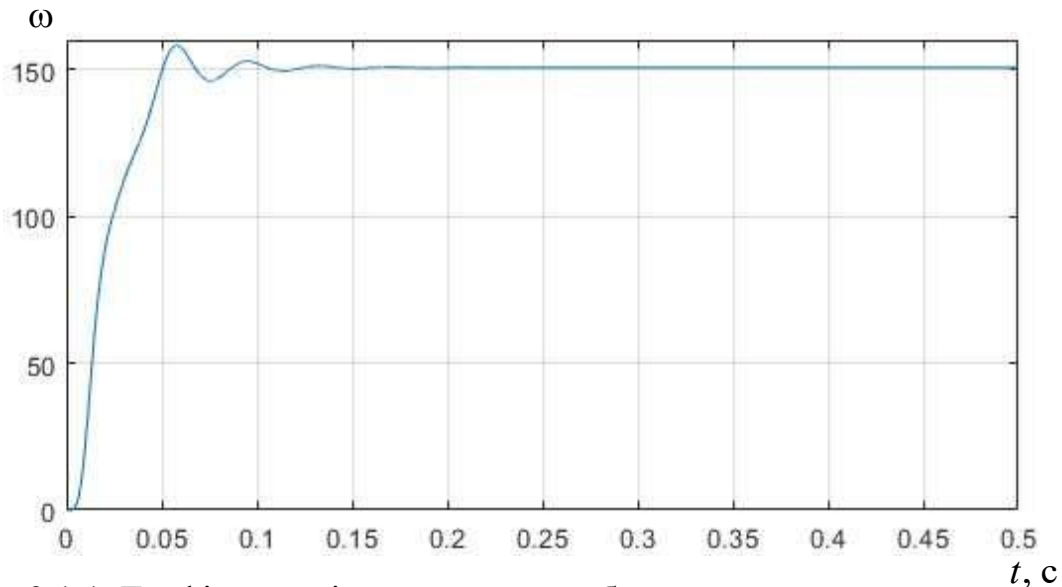


Рис. 3.1.1. Графік перехідного процесу обертання асинхронного двигуна приводу вентилятора (1 дослід)

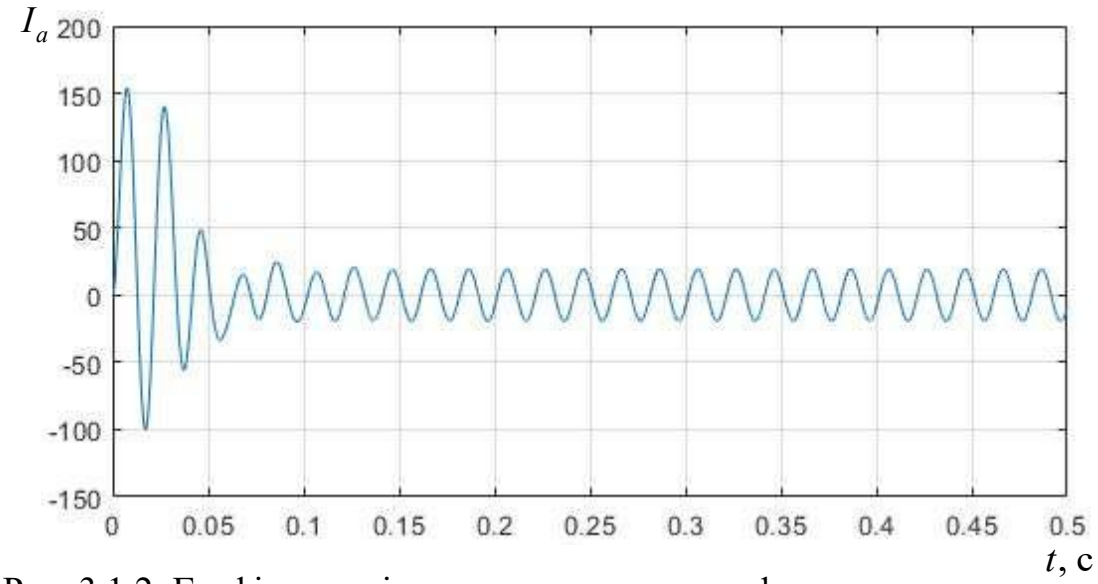


Рис. 3.1.2. Графік перехідного процесу струму фази асинхронного двигуна приводу вентилятора (1 дослід)

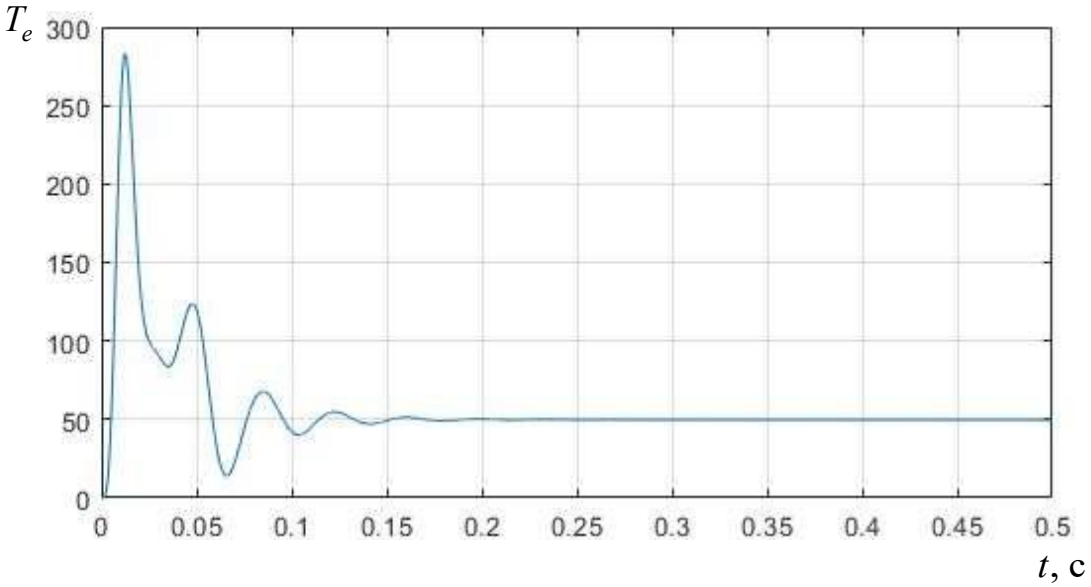


Рис. 3.1.3. Графік перехідного процесу моменту обертання асинхронного двигуна приводу вентилятора (1 дослід)

3.1.2. Дослідження динаміки системи «Частотний перетворювач – АД – Вентилятор» у режимі плавного пуску. Наступним етапом імітаційного моделювання стала перевірка ефективності частотного регулювання. Для цього було проведено експеримент із розгоном вентилятора за лінійним законом зміни частоти. В якості базової схеми використано розроблену раніше модель (див. рис. 2.15). Тривалість рампи

розгону (acceleration time) було встановлено на рівні 1 секунди, а загальний час симуляції склав 1,2 секунди, що дозволяє оцінити як перехідний процес, так і вихід на усталений режим.

Процес керування ілюструється наступними діаграмами.

1. Рис. 3.2.1: Графік зміни завдання на частоту статора. Система формує лінійно зростаючий сигнал від 0 до 50 Гц, який слугує еталоном для контуру регулювання.

2. Рис. 3.2.2: Осцилограма завдання фазних напруг (u_{abc}). Амплітуда цих сигналів зростає синхронно з частотою, реалізуючи скалярний закон керування $U / f = const$. Це гарантує стабільність магнітного потоку машини під час прискорення.

Реакція виконавчого механізму на керуючі впливи відображена на серії графіків:

- Динаміка швидкості (Рис. 3.2.3): крива розгону ротора має плавний, аперіодичний характер і точно відслідковує задану рампу. Відсутність перерегулювання свідчить про коректне налаштування параметрів системи.
- Струмові характеристики (Рис. 3.2.4): на діаграмі фазного струму (фаза А) спостерігається контрольоване зростання амплітуди без критичних пускових кидків, характерних для прямого пуску. Синусоїдальна форма струму свідчить про ефективну фільтрацію вищих гармонік індуктивністю статора.
- Крутний момент (Рис. 3.2.5): електромагнітний момент двигуна під час розгону утримується на рівні, необхідному для подолання інерції та опору вентилятора. Важливо зазначити, що пікові значення моменту значно менші, ніж при прямому пуску (280 Н·м), що знижує механічний стрес для обладнання.
- Лінійна напруга (Рис. 3.2.6): на виході інвертора формується послідовність прямокутних імпульсів, амплітуда та шпаруватість яких визначаються алгоритмом ШІМ.

- Потужність (Рис. 3.2.7): Розрахункова крива споживаної потужності вентилятора демонструє класичну кубічну залежність від швидкості, досягаючи номіналу в кінці циклу розгону.
- Напруга ланки постійного струму (Рис. 3.2.11): Графік вхідної напруги інвертора (V_{dc}) показує стабільність живлення під навантаженням.

Для глибшого аналізу якості електроенергії було розглянуто фрагменти осцилограм на інтервалі стабілізації 1,16–1,20 с:

- Рис. 3.2.8: Деталізований вигляд лінійної напруги демонструє дискретну структуру ШІМ-сигналу.
- Рис. 3.2.9: Збільшений фрагмент струму фази А дозволяє побачити високочастотні пульсації («зубці»), викликані комутацією транзисторів.
- Рис. 3.2.10: Осцилограма моменту в масштабі показує наявність незначних пульсацій навколо середнього значення, що є неминучим наслідком використання перетворювальної техніки, проте їх рівень є допустимим для вентиляційних систем.

Отримані результати підтверджують адекватність моделі та ефективність обраного методу плавного пуску.

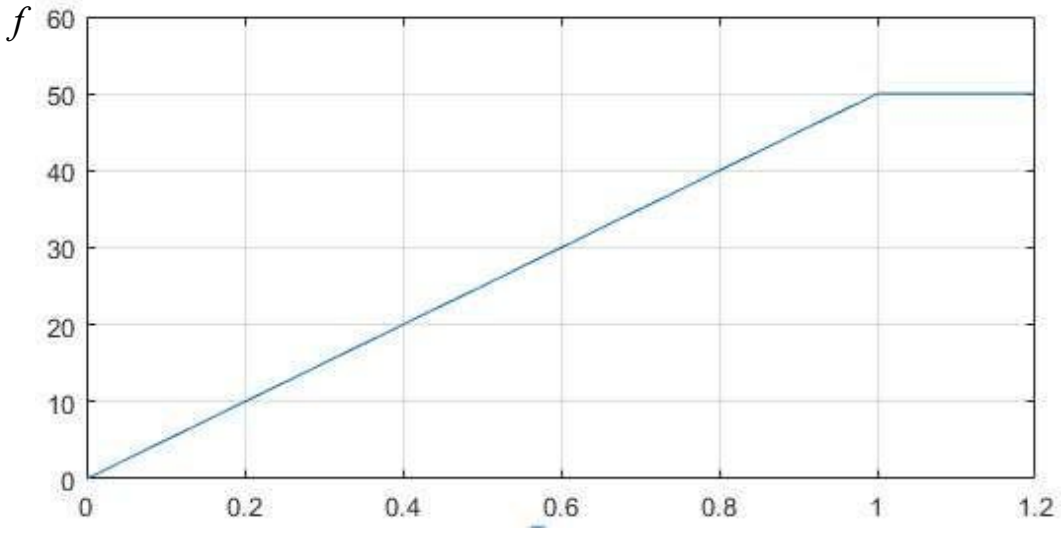


Рис. 3.2.1. Графік зміни задаючої частоти інвертора (2 дослід)

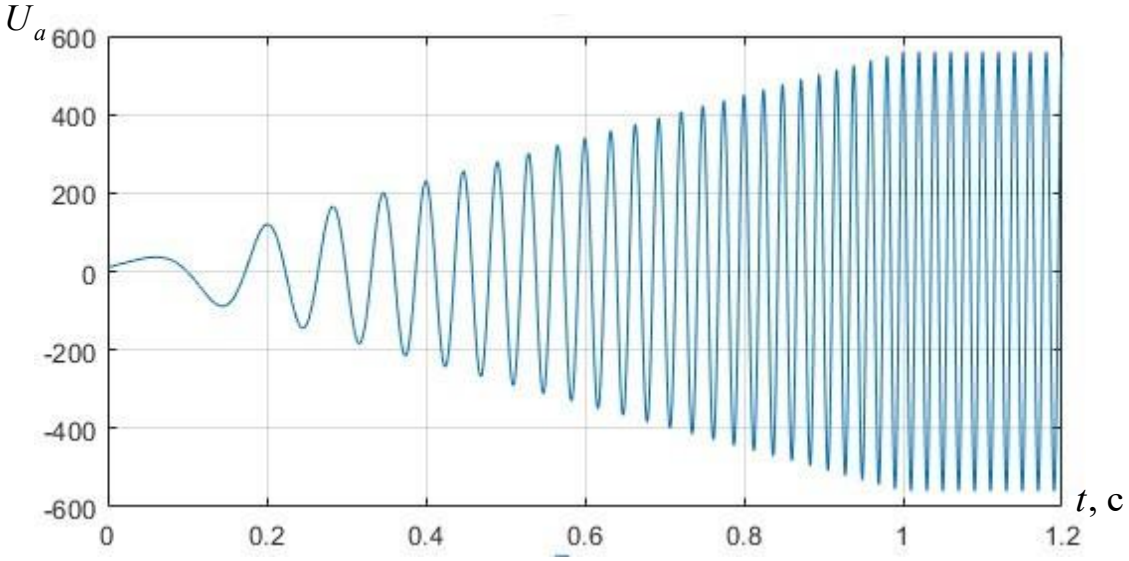


Рис. 3.2.2. Графік зміни задаючої напруги інвертора (2 дослід)

Рис. 3.2.3. Графік зміни швидкості асинхронного двигуна приводу вентилятора (2 дослід)

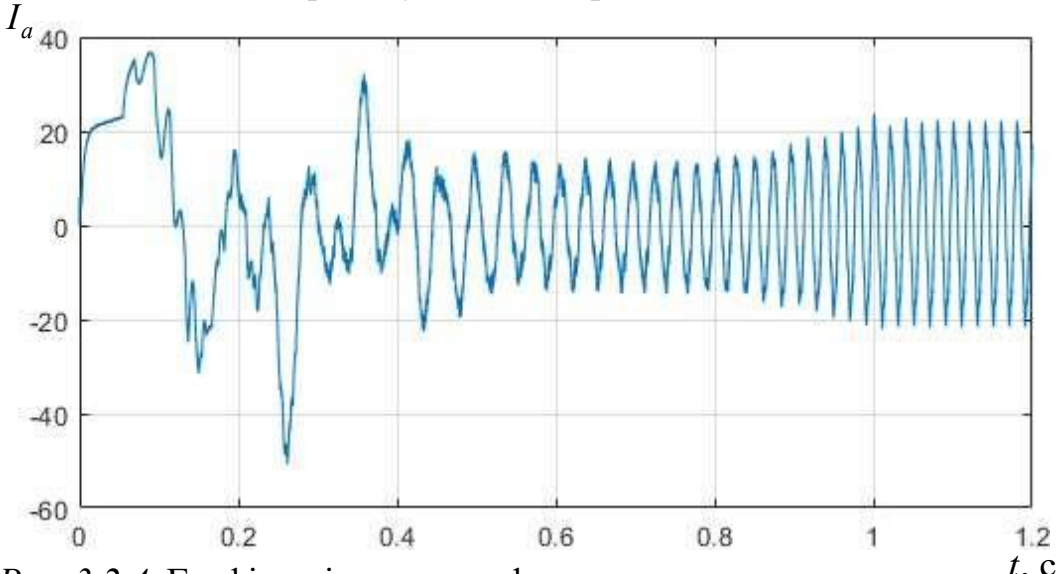


Рис. 3.2.4. Графік зміни струму фази асинхронного двигуна приводу вентилятора (2 дослід)

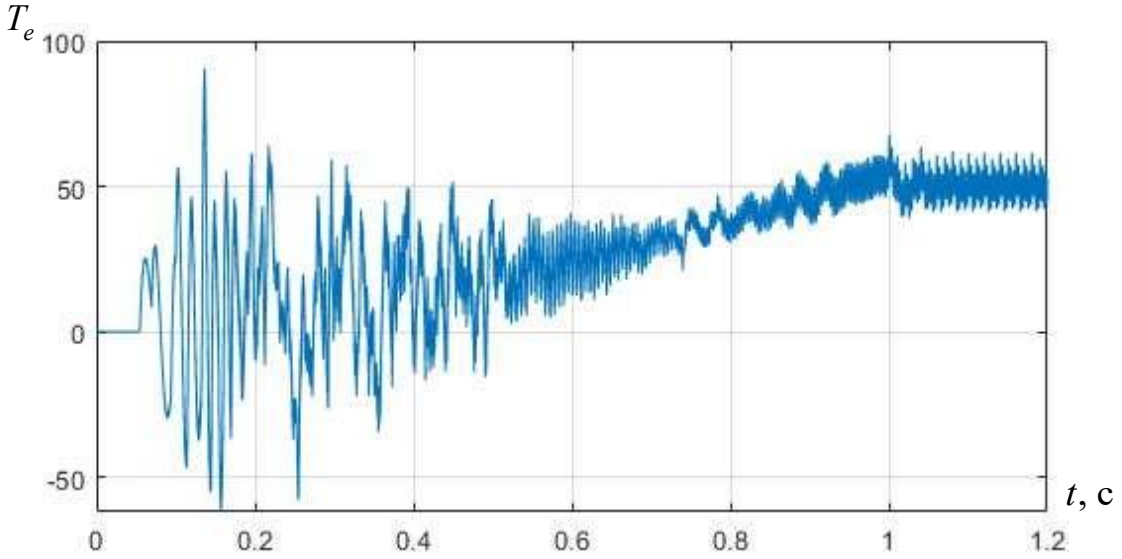


Рис. 3.2.5. Графік зміни електромагнітного моменту асинхронного двигуна приводу вентилятора (2 дослід)

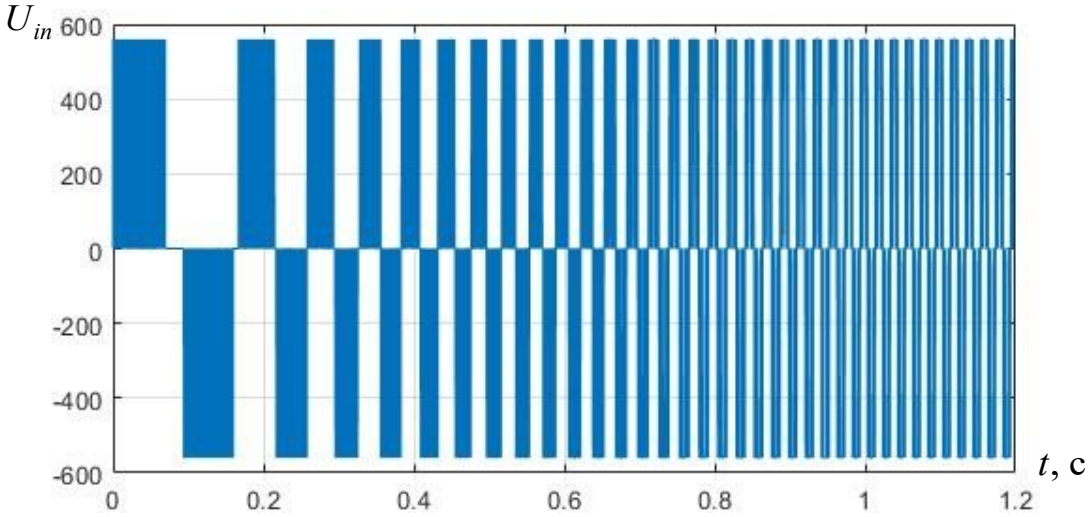


Рис. 3.2.6. Графік зміни напруги на вході інвертора приводу вентилятора (2 дослід)

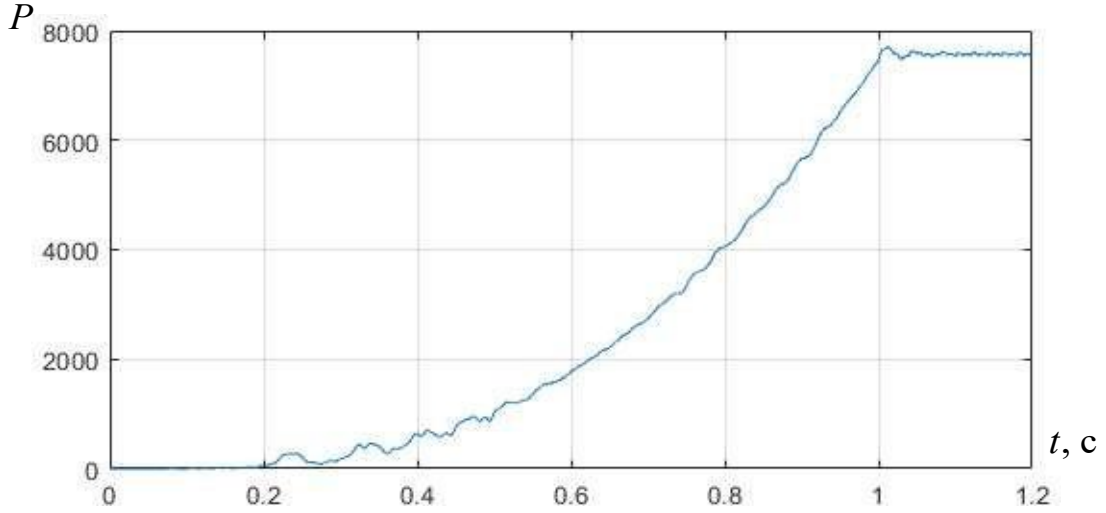


Рис. 3.2.7. Графік зміни потужності двигуна приводу вентилятора (2 дослід)

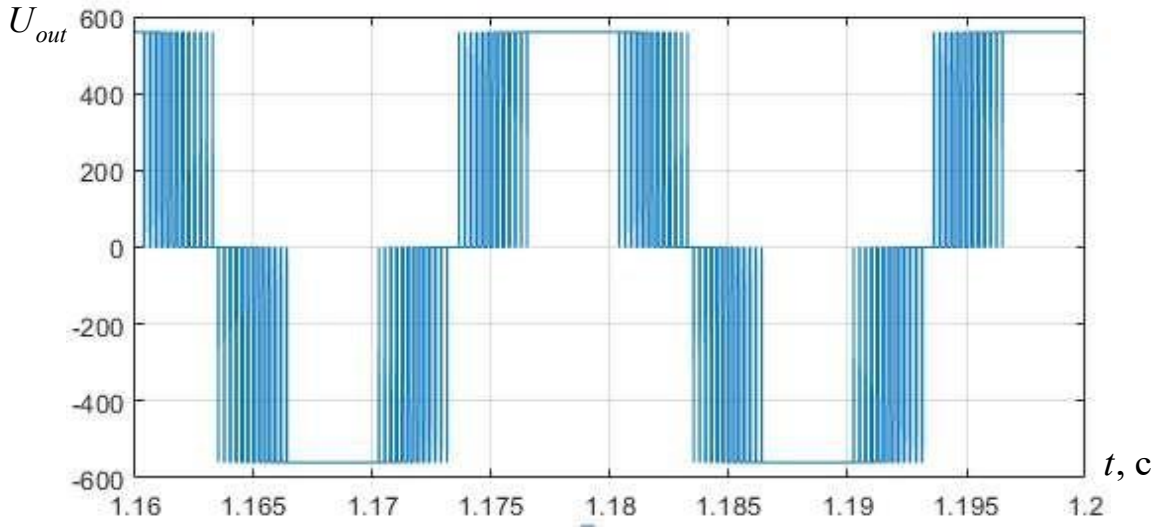


Рис. 3.2.8. Графік зміни напруги на виході інвертора приводу вентилятора (2 дослід)

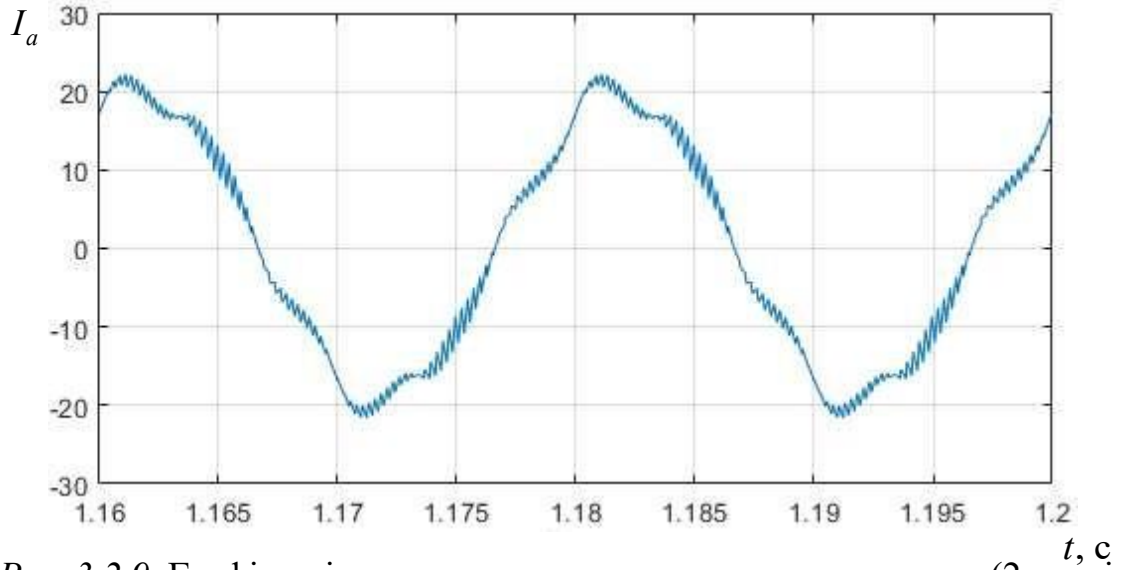


Рис. 3.2.9. Графік зміни струму двигуна приводу вентилятора (2 дослід)

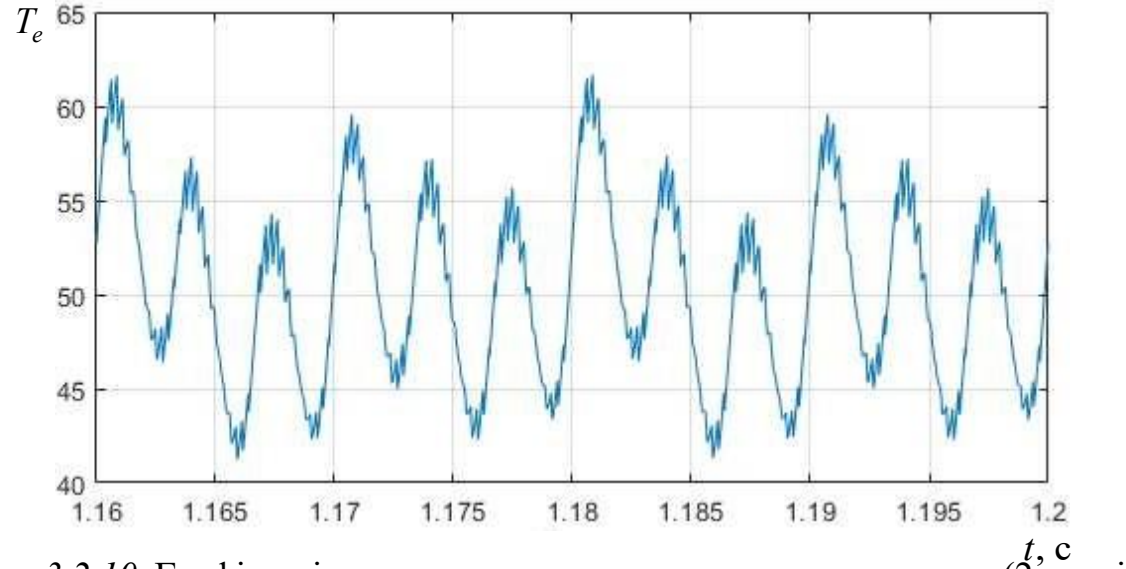


Рис. 3.2.10. Графік зміни моменту двигуна приводу вентилятора (2 дослід)

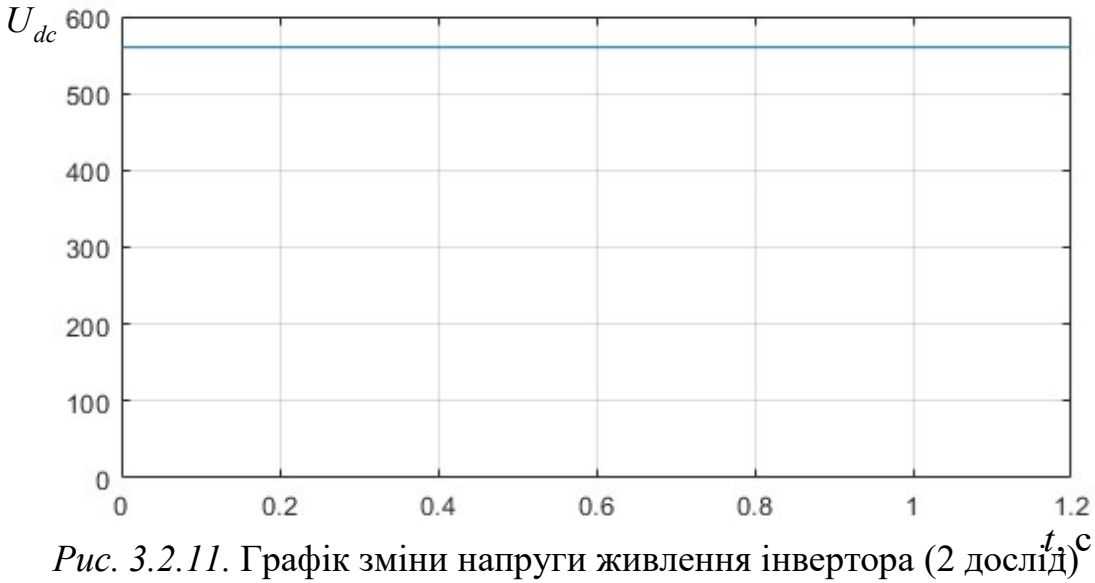


Рис. 3.2.11. Графік зміни напруги живлення інвертора (2 дослід)

3.1.3. Аналіз роботи комплексної системи «Випрямляч – Інвертор – АД – Вентилятор». Наступна серія імітаційних експериментів присвячена дослідженню повної топології частотно-регульованого електроприводу. На відміну від попередніх дослідів, де ланка постійного струму живилася від ідеального джерела, дана модель (рис. 2.15) враховує вплив вхідного некерованого випрямляча. Це дозволяє оцінити процеси не лише в двигуні, а й реальну структуру напруги, що формується в ланці постійного струму та трансформується інвертором.

Параметри симуляції залишилися незмінними: задано режим плавного розгону (Soft Start) з темпом наростання частоти 1 секунда. Загальний час моделювання становить 1,2 с, що охоплює етап пуску та вихід на робочу точку.

Характеристика керуючих впливів:

Алгоритм керування системою ілюструють наступні графіки:

- Рис. 3.3.1: Відображає рампу завдання частоти, яка лінійно зростає від 0 до номінальних 50 Гц.
- Рис. 3.3.2: Демонструє формування амплітуди завдання фазних напруг (u_{abc}). Закон зміни напруги чітко корелює з частотою, забезпечуючи виконання умови скалярного керування для стабілізації магнітного

потоку статора.

Електромеханічні показники:

Реакція двигуна на подане живлення представлена серією осцилограм:

- Швидкість (Рис. 3.3.3): Крива розгону вентилятора має плавний аперіодичний характер, досягаючи усталеного значення без коливань, що свідчить про якісне налаштування параметрів розгону.
- Струм статора (Рис. 3.3.4): На графіку фазного струму (фаза А) відсутні критичні пускові перевантаження. Амплітуда струму зростає контрольовано, пропорційно збільшенню навантаження на валу.
- Електромагнітний момент (Рис. 3.3.5): Динаміка моменту відповідає квадратичній характеристиці механічного опору вентилятора, забезпечуючи надійний пуск без ударних навантажень на механіку.

Енергетичний аналіз та якість напруги:

- Лінійна напруга (Рис. 3.3.6): На клемах двигуна формується класична ШІМ-послідовність імпульсів.
- Потужність (Рис. 3.3.7): Розрахункова крива підтверджує, що споживана потужність вентилятора зростає пропорційно кубу кутової швидкості ($P \sim \omega^3$).

Для оцінки впливу високочастотної комутації транзисторів було проведено мікроаналіз сигналів на інтервалі усталеного режиму (1,16–1,20 с):

- Рис. 3.3.8: Деталізована осцилограма лінійної напруги демонструє дискретність вихідного сигналу інвертора.
- Рис. 3.3.9 (Струм): На синусоїді струму чітко простежуються високочастотні пульсації («зубці»), викликані перемиканням ключів. Ці пульсації є джерелом додаткових теплових втрат у міді статора.
- Рис. 3.3.10 (Момент): Графік демонструє наявність пульсацій електромагнітного моменту навколо середнього значення. Хоча їх амплітуда є незначною, цей фактор слід враховувати при оцінці вібраційного навантаження на підшипникові вузли.

Отримані результати підтверджують працездатність повної моделі

електроприводу та адекватність обраних налаштувань скалярного регулятора в умовах реального живлення від випрямляча.

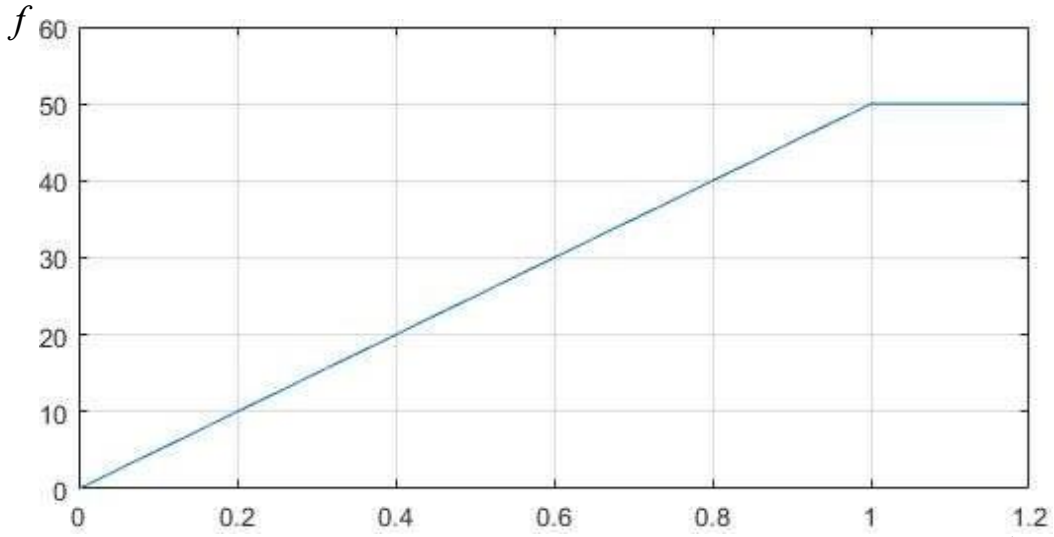


Рис. 3.3.1. Графік зміни задаючої частоти інвертора (3 дослід)

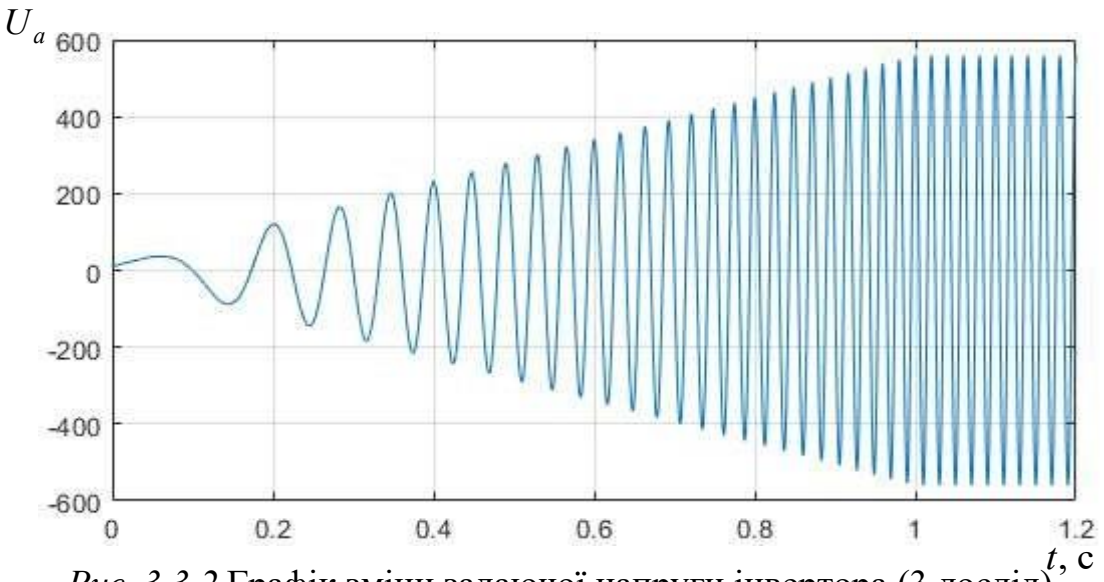


Рис. 3.3.2 Графік зміни задаючої напруги інвертора (3 дослід)

ω

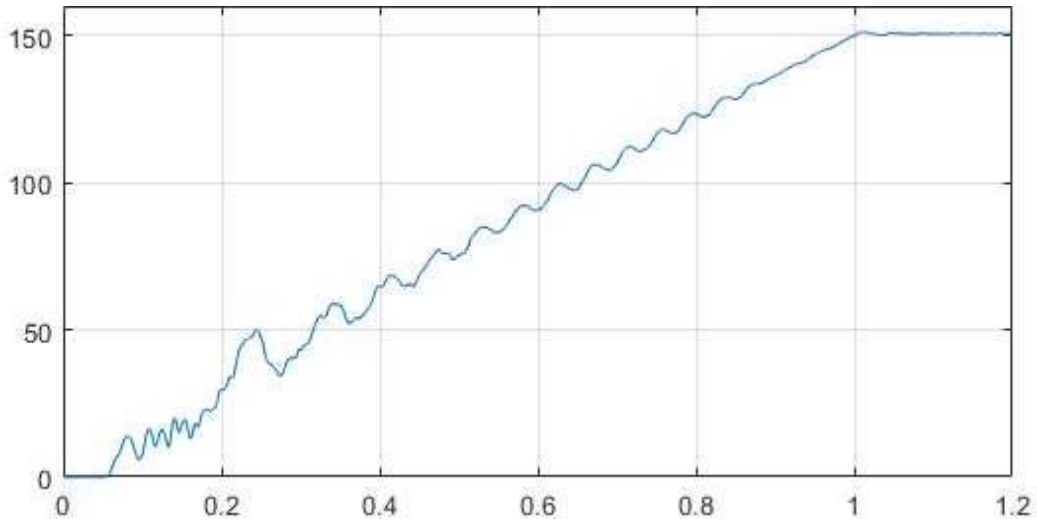


Рис. 3.3.3. Графік зміни швидкості асинхронного двигуна приводу вентилятора (3 дослід)

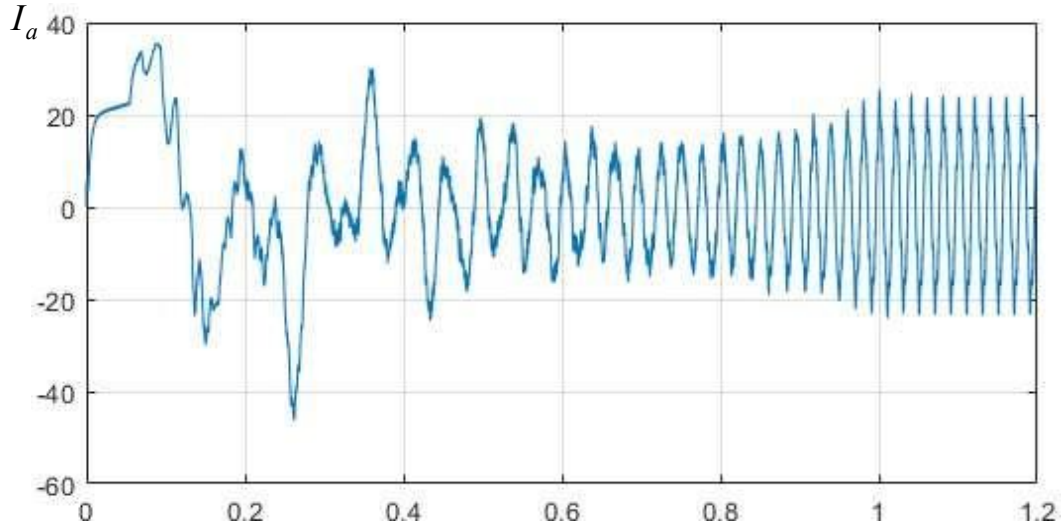


Рис. 3.3.4. Графік зміни струму фази асинхронного двигуна приводу вентилятора (3 дослід)

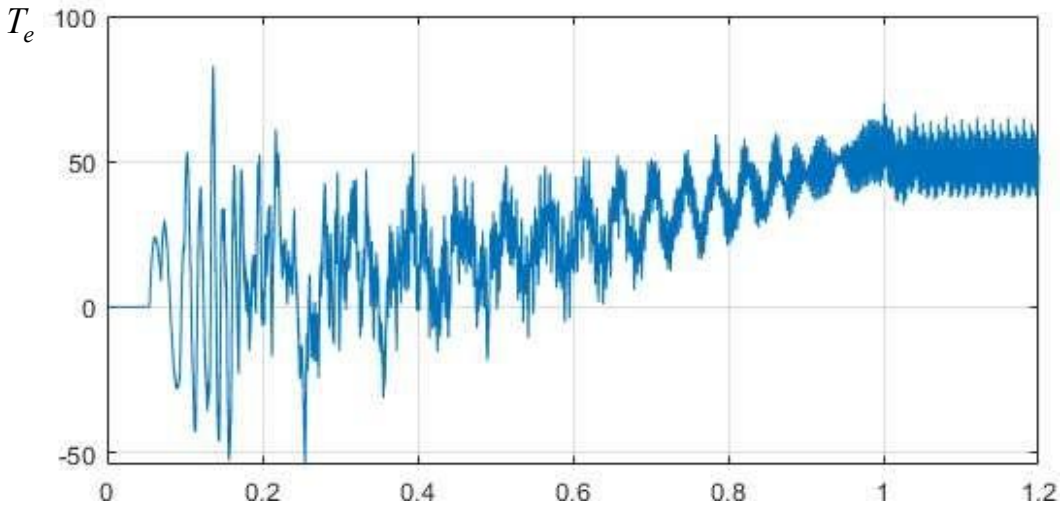


Рис. 3.3.5. Графік зміни електромагнітного моменту асинхронного двигуна приводу вентилятора (3 дослід)

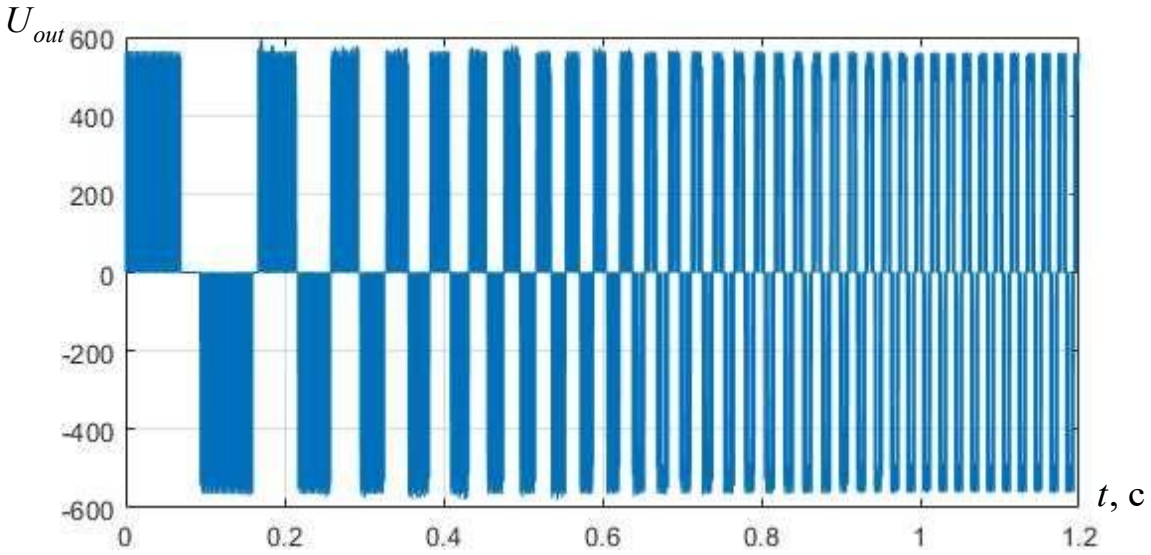


Рис. 3.3.6. Графік зміни напруги на виході ПЧ приводу вентилятора (3 дослід)

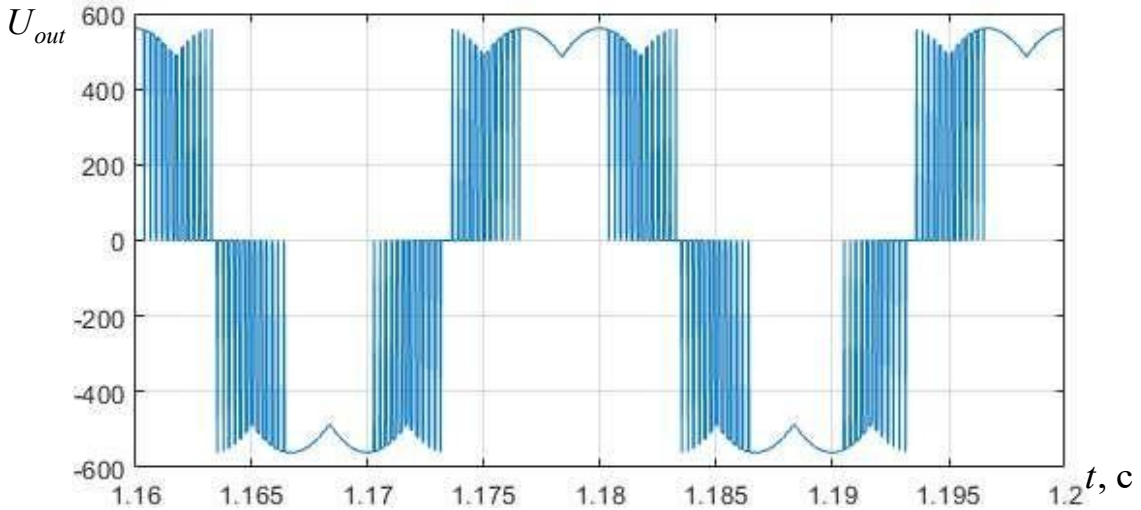


Рис. 3.3.7. Графік зміни напруги на виході ПЧ приводу вентилятора (фрагмент) (3 дослід)

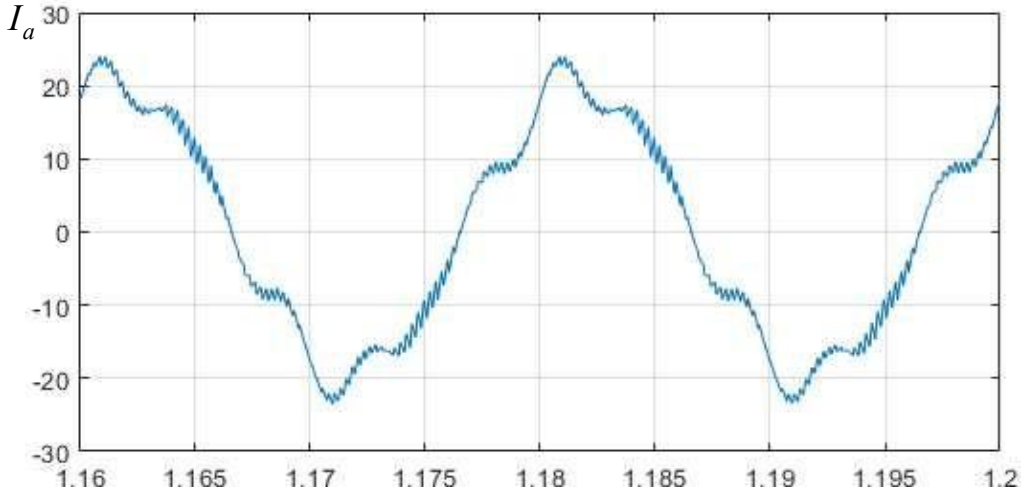


Рис. 3.3.8. Графік зміни струму фази асинхронного двигуна приводу вентилятора (2 дослід)

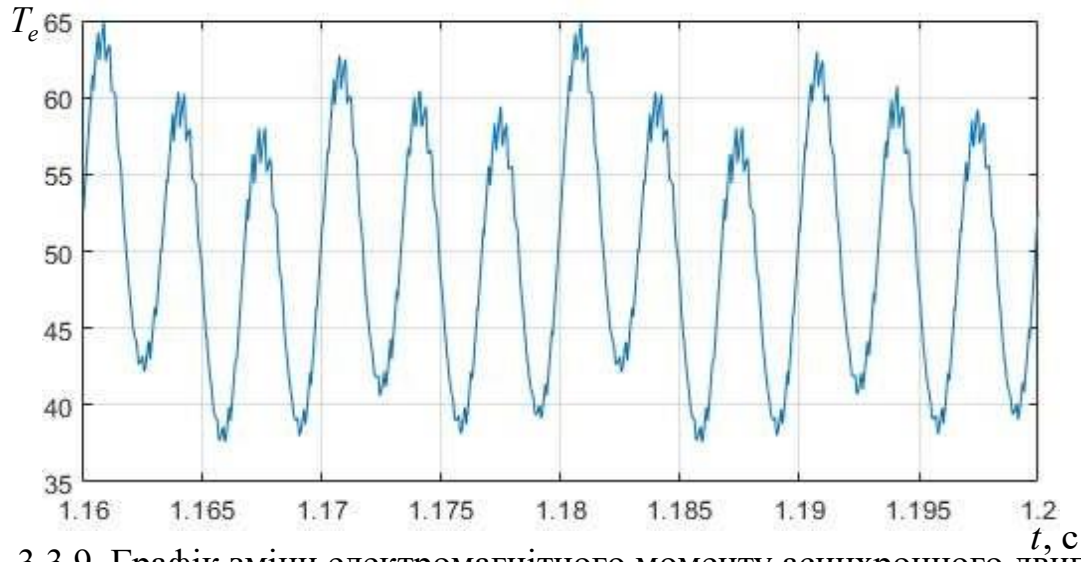


Рис. 3.3.9. Графік зміни електромагнітного моменту асинхронного двигуна приводу вентилятора (3 дослід)

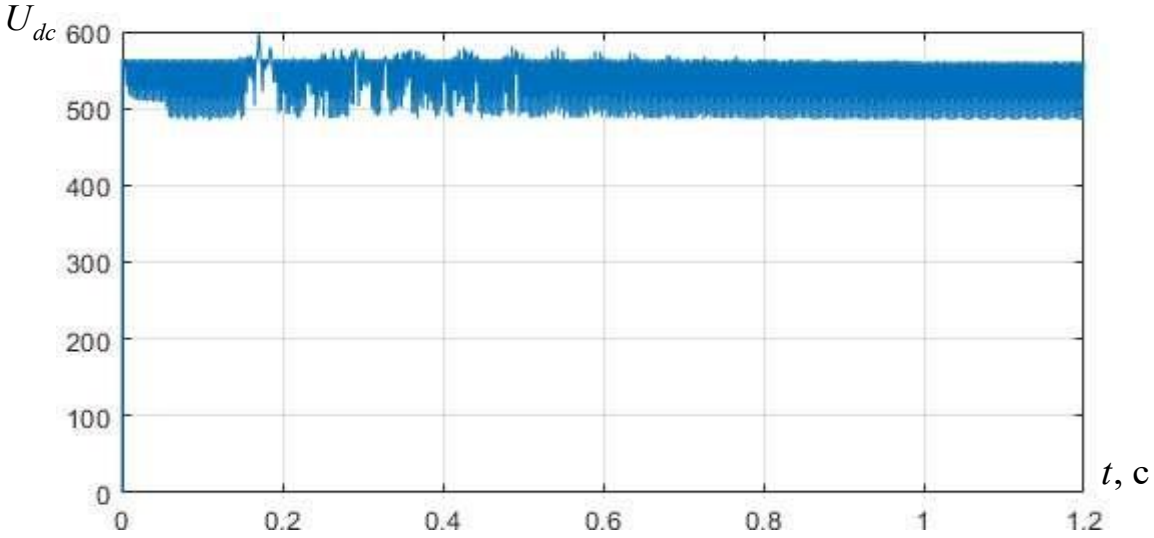


Рис. 3.3.10. Графік зміни напруги живлення інвертора (3 дослід)

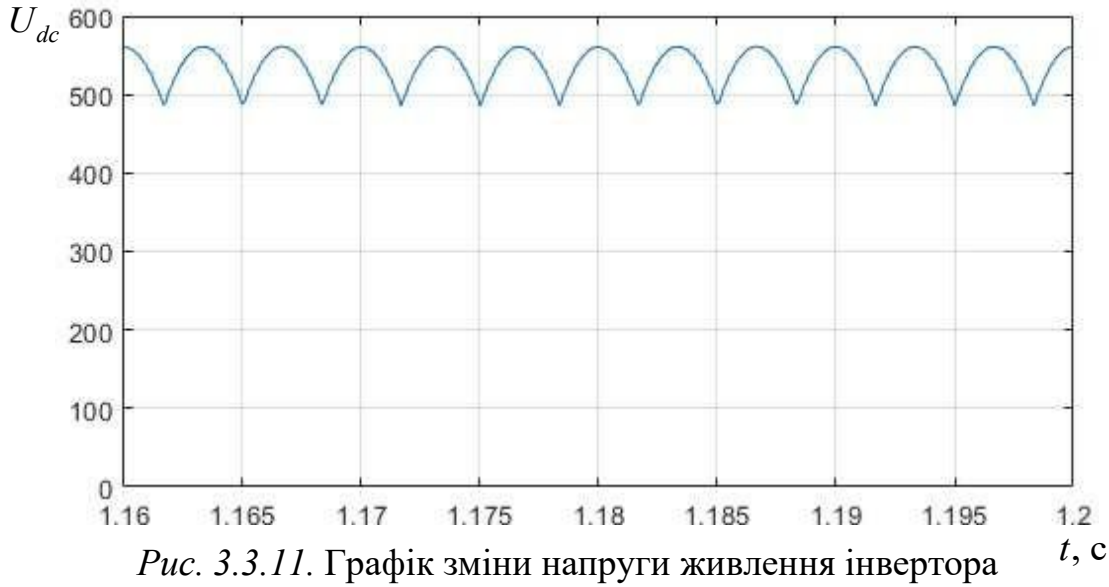


Рис. 3.3.11. Графік зміни напруги живлення інвертора (фрагмент) (3 дослід)

3.1.4. Дослідження динаміки на уточненій моделі. Завершальний етап симуляції (Четвертий експеримент) було проведено на найбільш деталізованій версії математичної моделі (представленій на рис. 2.14). Ця схема враховує нелінійності напівпровідникових елементів, реальний активний опір джерела живлення та уточнені параметри аеродинамічного опору.

Умови експерименту залишалися стандартизованими для можливості коректного порівняння: режим плавного пуску з тривалістю наростання частоти 1,0 с. Однак, часовий інтервал реєстрації даних було розширено до 2,2 с, що дозволило детальніше проаналізувати стабільність роботи системи в усталеному режимі після завершення перехідних процесів.

Результати моделювання:

Комплекс отриманих осцилограм демонструє наступну динаміку:

- Керуючі сигнали (Рис. 3.4.1, 3.4.2): Завдання на частоту та амплітуду напруги змінюється лінійно, забезпечуючи виконання закону $U / f = const$ без відхилень.
- Механічні параметри (Рис. 3.4.3, 3.4.5): Швидкість двигуна досягає номінального значення плавно, без перерегулювання. Графік електромагнітного моменту (рис. 3.4.5) демонструє відсутність ударних навантажень, характерних для прямого пуску. Момент зростає поступово, долаючи інерцію ротора та опір повітряного середовища.
- Електричні параметри (Рис. 3.4.4, 3.4.6, 3.4.7): Струм статора має синусоїдальну форму з накладеними пульсаціями від ШІМ, а споживана потужність виходить на номінал по кубічній параболі.

Порівняльний аналіз ефективності (Прямий пуск vs Частотний пуск)

Ключовим результатом дослідження є кількісне порівняння показників навантаження, отриманих у першому (DOL) та четвертому (VFD) експериментах. Результати зведено до наступних показників:

1. Пусковий струм: впровадження частотного регулювання дозволило знизити максимальну амплітуду пускового струму з критичних 155 А (при

прямому пуску) до 37,5 А, меншення струмового навантаження у 4,2 раза. Це ліквідує просадки напруги в мережі живлення підприємства та дозволяє зменшити переріз кабельних ліній.

2. Ударний момент: пікове значення електромагнітного моменту знизилося з 280 Н·м до 60 Н·м, зменшення механічного удару в 4,7 раза. Це критично важливо для подовження ресурсу підшипників двигуна, муфтових з'єднань та безпосередньо крильчатки вентилятора, запобігаючи втомному руйнуванню металу.

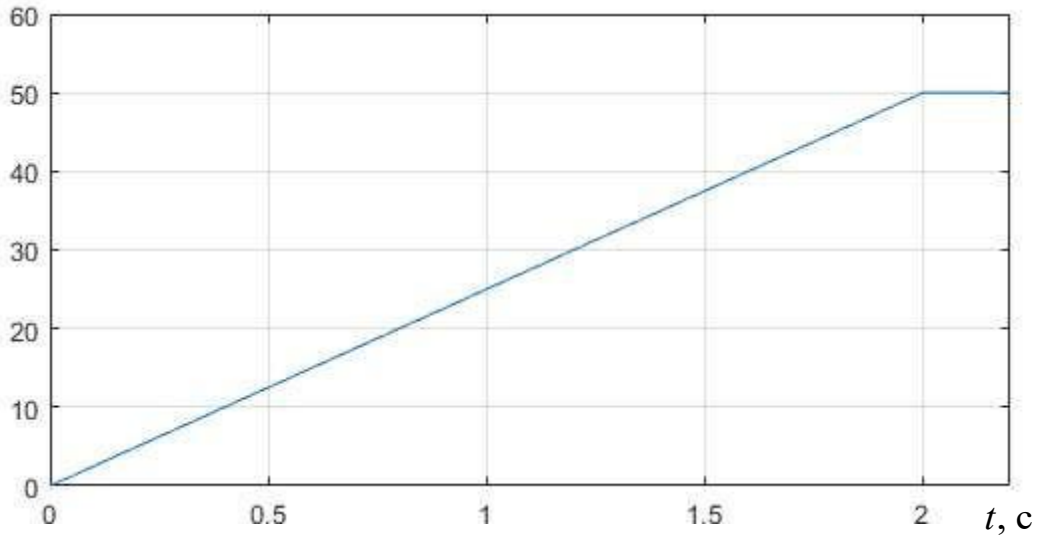


Рис. 3.4.1 Графік зміни задаючої частоти інвертора (4 дослід)

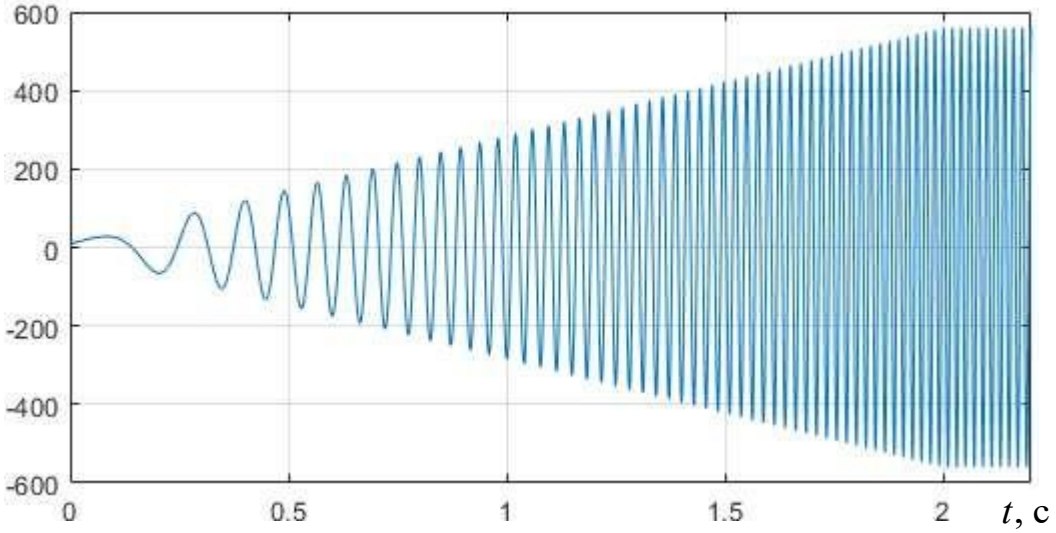


Рис. 3.4.2 Графік зміни задаючої напруги інвертора (4 дослід)

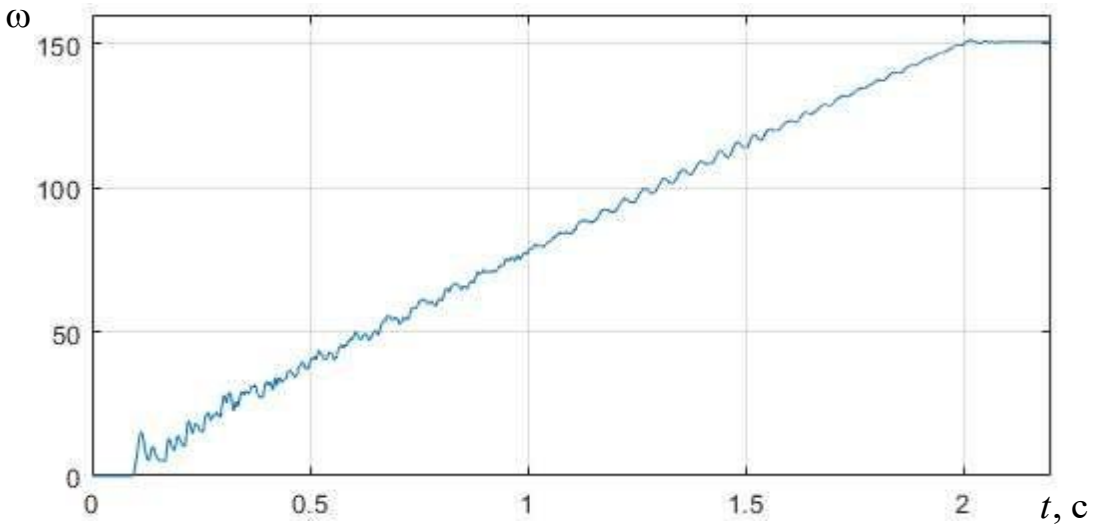


Рис. 3.4.3. Графік зміни швидкості асинхронного двигуна приводу вентилятора (4 дослід)

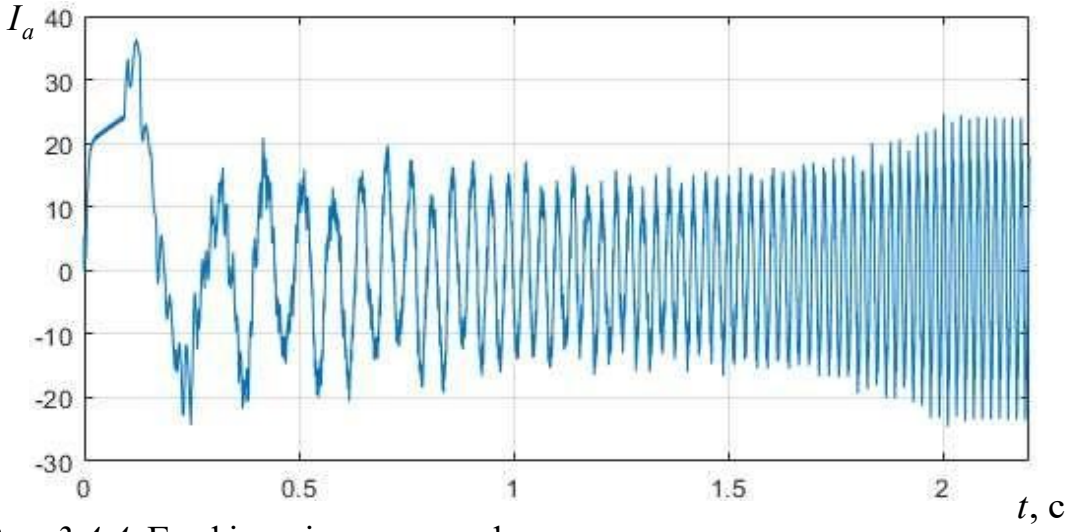


Рис. 3.4.4. Графік зміни струму фази асинхронного двигуна приводу вентилятора (4 дослід)

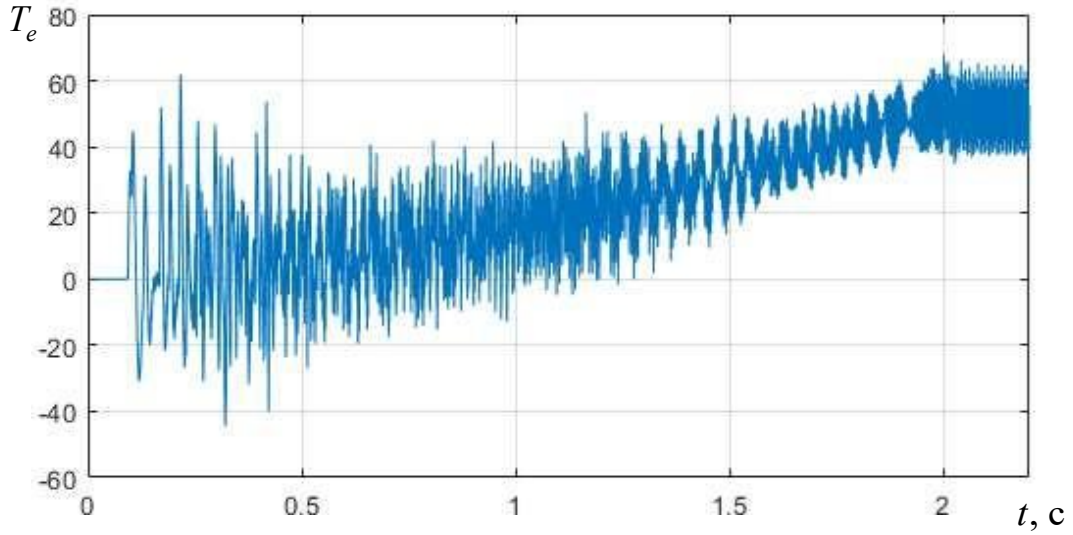


Рис. 3.4.5. Графік зміни електромагнітного моменту асинхронного двигуна приводу вентилятора (4 дослід)

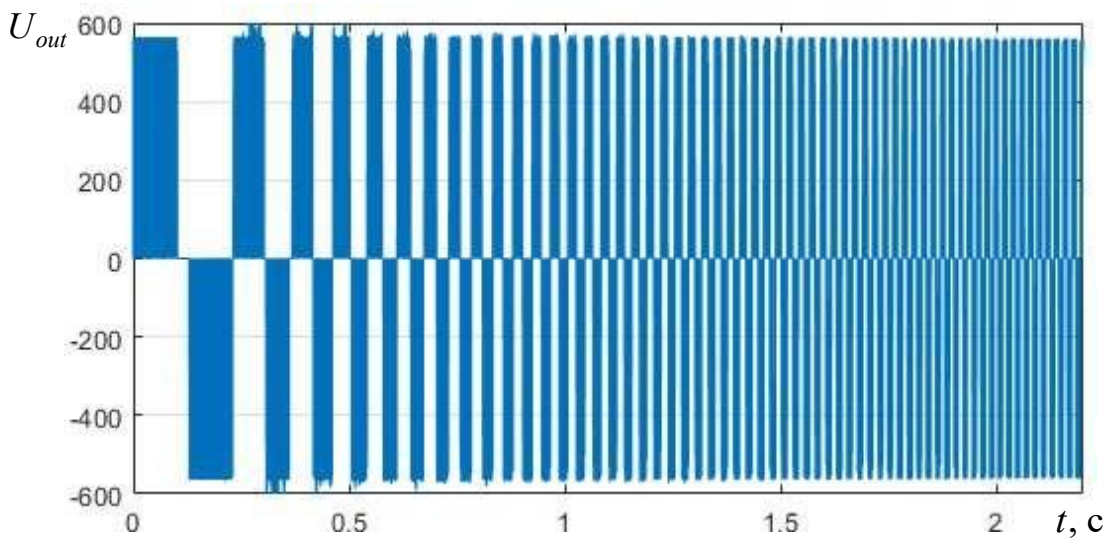


Рис. 3.4.6. Графік зміни напруги на виході інвертора приводу вентилятора (4 дослід)

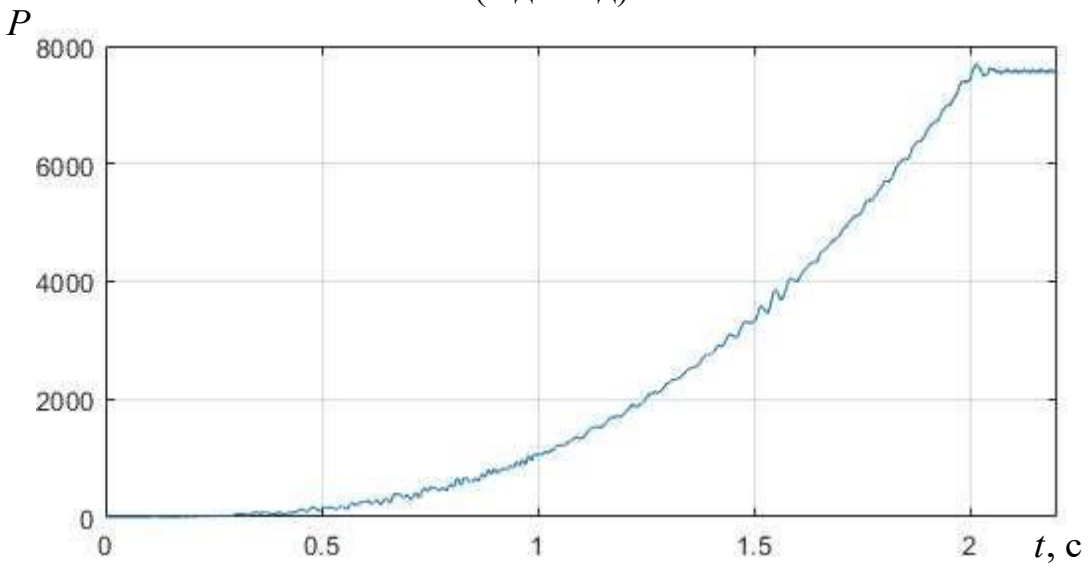


Рис. 3.4.7. Графік зміни потужності двигуна приводу вентилятора (4 дослід)

3.2. Порівняльний аналіз результатів дослідження

Отримані результати імітаційного моделювання переконливо доводять, що впровадження методу скалярного частотного керування докорінно змінює характер динамічних процесів у електроприводі. Замість неконтрольованого «жорсткого» пуску, який супроводжується небезпечними струмовими кидками та ударними електромагнітними моментами, реалізується плавний, повністю керований технологічний процес розгону. Це дозволяє нівелювати

ризики механічного руйнування муфтових з'єднань та робочого колеса вентилятора, суттєво подовжуючи їхній експлуатаційний ресурс.

Окрім виконання базових захисних функцій (обмеження струму, захист від перевантажень), система забезпечує виняткову гнучкість експлуатації. Завдяки наявності частотного перетворювача з'являється можливість прецизійного регулювання вихідних аеродинамічних параметрів: об’ємної продуктивності (Q) та повного тиску (H). Оскільки ці величини прямо залежать від кутової швидкості валу, оператор або система автоматики можуть у реальному часі адаптувати роботу установки до змінних умов технологічного процесу (наприклад, зміни запиленості фільтрів або температури повітря).

Такий підхід є запорукою високої енергоефективності всього вентиляційного комплексу. Можливість оптимізації режимів дозволяє відмовитися від енергозатратних методів регулювання заслінками (дроселювання). Враховуючи кубічну залежність споживаної потужності від швидкості ($P \sim \omega^3$), адаптивне зниження обертів навіть на 10–15% забезпечує економію електроенергії до 30–40% порівняно з нерегульованим приводом.

Висновки до розділу

На основі проведеного імітаційного моделювання системи електроприводу вентиляційної установки в середовищі MATLAB Simulink можна зробити наступні висновки:

1. Створена комплексна математична модель, що включає ланки «Випрямляч – Інвертор – Асинхронний двигун – Вентилятор», коректно відтворює електромеханічні процеси в системі. Отримані залежності підтверджують, що момент опору на валу змінюється за квадратичним законом ($M_c \sim \omega^2$), а споживана потужність – за кубічним ($P \sim \omega^3$), що відповідає теорії подібності турбомеханізмів.

2. Порівняльний аналіз режимів пуску показав, що застосування

перетворювача частоти дозволило знизити максимальні пускові струми з критичних 155 А (при прямому підключенні до мережі) до 37,5 А (при частотному пуску). Зменшення струмового навантаження у 4,2 раза дозволяє уникнути просадок напруги в живильній мережі та зменшити тепловий вплив на ізоляцію обмоток статора.

3. Встановлено, що плавний розгін двигуна (за лінійною рампою тривалістю 1 с) забезпечує зменшення пікового електромагнітного моменту з 280 Н·м до 60 Н·м (у 4,7 раза). Ліквідація ударних навантажень сприяє значному подовженню ресурсу механічних вузлів вентилятора (підшипників, муфт та крильчатки).

4. Дослідження осцилограм підтвердило, що скалярна система керування забезпечує аперіодичний характер перехідних процесів без перерегулювання та автоколивань швидкості. Попри наявність високочастотних пульсацій струму та моменту, викликаних ШІМ-модуляцією, їх рівень залишається в межах допустимих норм і не впливає на стабільність роботи вентиляційної установки.

РОЗДІЛ 4
ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час налагодження та промислової експлуатації електромеханічних систем, зокрема автоматизованих комплексів на базі перетворювачів частоти, домінуючим фактором ризику для персоналу є потенційна можливість ураження електричним струмом. Специфіка досліджуваного обладнання полягає в наявності не лише напруги промислової мережі, а й високої напруги в ланці постійного струму перетворювача (близько 560 В), яка може зберігатися на конденсаторах навіть після відключення живлення, що створює додаткові загрози.

У широкому розумінні, електробезпека визначається як регламентована нормативними документами система організаційних та технічних рішень. Її головна мета — гарантувати захист працівників від шкідливого та небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітних полів радіочастотного діапазону та розрядів статичної електрики. Ефективна система безпеки спрямована на збереження здоров'я та працездатності персоналу в умовах виробництва.

Для мінімізації ризиків травматизму в електроустановках застосовується ієрархічна система захисних засобів, основними з яких є:

1. Унеможливлення контакту зі струмопровідними частинами. Досягається шляхом встановлення суцільних огорож, бар'єрів, розташування небезпечних елементів на недосяжній висоті або в замикних електротехнічних шафах (для ПЧ та комутаційної апаратури).
2. Використання безпечної наднизької напруги. Для кіл керування, сигналізації та місцевого освітлення рекомендовано застосовувати напругу, що не перевищує 42 В (змінного струму) або 110 В (постійного струму), що суттєво знижує ризик фібриляції серця при випадковому дотику.

3. Захист від непрямого дотику. Передбачає автоматичне вимкнення живлення (за допомогою запобіжників або автоматичних вимикачів) у випадку пробою ізоляції та появи потенціалу на відкритих провідних частинах (корпусах двигунів, станинах верстатів).
4. Застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Використання діелектричних рукавичок, бот, килимків та інструменту з ізольованими ручками виступає як додатковий бар'єр безпеки при оперативних перемиканнях.

Фундаментальним способом запобігання протіканню струму через тіло людини є електрична ізоляція. Всі провідники повинні мати надійне покриття з діелектричних матеріалів, стійких до термічних, хімічних та механічних впливів. Залежно від умов експлуатації розрізняють:

- Робочу ізоляцію — забезпечує нормальне функціонування установки та базовий захист.
- Додаткову ізоляцію — передбачена на випадок пошкодження робочої.
- Подвійну та посилену ізоляцію — використовується в ручному електроінструменті та приладах класу II для підвищення надійності.

Варто зазначити, що в системах з частотним регулюванням ізоляція обмоток двигуна піддається підвищеному навантаженню через вплив піків перенапруги (dU/dt), що вимагає застосування матеріалів з покращеними діелектричними властивостями.

У випадках порушення цілісності ізоляції металеві неструмопровідні частини обладнання (корпуси, каркаси шаф, кожухи вентиляторів) можуть опинитися під фазною напругою. Дотик людини до такого корпусу класифікується як однофазне включення в мережу, що є смертельно небезпечним.

Для запобігання електротравматизму застосовують захисне заземлення, занулення або захисне відключення.

Захисне заземлення являє собою навмисне електричне з’єднання металевих частин електроустановки з заземлювальним пристроєм (контуром

заземлення). Фізичний принцип захисту базується на шунтуванні тіла людини. Оскільки електричний опір заземлювального пристрою (згідно з ПУЕ має бути не більше 4 Ом) є незрівнянно меншим за опір тіла людини (розрахункова величина — 1000 Ом), то при замиканні на корпус основна частина струму стікає в землю.

Це дозволяє досягти двох цілей:

1. Зниження напруги дотику на корпусі обладнання до безпечних значень.
2. Вирівнювання потенціалів між обладнанням та землею, що усуває небезпеку ураження струмом.

Згідно з чинними нормами ПУЕ (Правила улаштування електроустановок), для електроустановок із напругою до 1 кВ, до яких належить досліджувана система електроприводу, величина опору заземлювального контуру підлягає суворій регламентації. Максимально допустиме значення опору розтікання струму не повинно перевищувати 4 Ом незалежно від сезонних кліматичних змін (промерзання або висихання ґрунту). Винятком є малопотужні джерела живлення (генератори або трансформатори до 100 кВА), для яких дозволяється збільшення цього порогу до 10 Ом.

Фізична сутність захисту базується на принципі шунтування: оскільки опір заземлення (4 Ом) є мізерним у порівнянні з електричним опором тіла людини (розрахункове значення — 1000 Ом), то у випадку аварійного пробою ізоляції основна частина струму короткого замикання протече через металевий провідник у землю, оминаючи оператора.

Система заземлення складається з двох функціональних частин:

1. Заземлювач — металевий елемент або група елементів, що знаходяться у безпосередньому контакті з ґрунтом.

2. Заземлювальні провідники — мережа струмопровідних шин (зазвичай смугова сталь або мідь), що з’єднують корпуси обладнання з заземлювачем.

За способом улаштування заземлювачі класифікують на дві групи:

Штучні заземлювачі: спеціально змонтовані конструкції, виконані з кутової сталі, труб або суцільних стрижнів. Їх заглиблюють у ґрунт вертикально на глибину 2,5–3 метри та електрично з'єднують між собою горизонтальною смугою за допомогою дугового зварювання. Для систем із частотними перетворювачами важливо забезпечити надійний контакт для стікання високочастотних струмів витоку.

Природні заземлювачі: сторонні струмопровідні частини будівельних конструкцій, що мають постійний контакт із землею. До них відносять:

- металеві трубопроводи водопостачання (за винятком труб опалення та каналізації);
- арматурні каркаси залізобетонних фундаментів будівель;
- свинцеві оболонки підземних кабельних ліній.

Категорично заборонено використовувати як заземлювачі трубопроводи горючих рідин, газів та вибухонебезпечних сумішей.

Залежно від розташування відносно об'єкта захисту, виділяють два типи контурів:

1. Виносні (зосереджені): заземлювачі розміщуються на окремому майданчику за межами будівлі. Це просте рішення, але воно не забезпечує вирівнювання потенціалів всередині приміщення.

2. Контурні (розподілені): електроди розміщуються по периметру обладнання або будівлі. Такий варіант є більш безпечним, оскільки вирівнює потенціали на площі, де пересувається персонал, знижуючи ризик крокової напруги.

У промислових цехах, де експлуатуються вентиляційні системи, зазвичай монтують внутрішній магістральний контур заземлення (смуга на стінах). Критично важливою вимогою безпеки є паралельне приєднання кожного споживача.

Кожен елемент електроустановки (корпус двигуна, шафа перетворювача частоти, станина вентилятора) повинен приєднуватися до магістралі окремим провідником болтовим з'єднанням. Послідовне з'єднання

корпусів заземлювальним провідником суворо заборонено, оскільки при обриві кола всі наступні пристрої втрачають захист.

У чотирипровідних мережах трифазного струму з глухозаземленою нейтраллю трансформатора (системи TN) основним заходом захисту від непрямого дотику є занулення. Цей метод передбачає навмисне електричне з'єднання металевих неструмопровідних частин обладнання (корпусів двигунів, щитів керування), які потенційно можуть опинитися під напругою, з багаторазово заземленим нульовим провідником мережі.

У сучасній електротехніці чітко розмежовують два типи нульових провідників, що виконують різні функції:

1. Нульовий робочий провідник (N – Neutral): Використовується для живлення однофазних споживачів (освітлення, побутові прилади, кола керування контакторами) напругою 220 В. По ньому в нормальному режимі протікає робочий струм навантаження. Згідно з міжнародними стандартами, його ізоляція має блакитний колір.

2. Нульовий захисний провідник (PE – Protective Earth): Слугує виключно для цілей електробезпеки, з'єднуючи корпуси обладнання з глухозаземленою нейтраллю джерела живлення. В нормальному режимі струм по ньому не протікає. Маркування ізоляції — жовто-зелені смуги.

Головна мета занулення полягає у трансформації аварійного пробою на корпус у однофазне коротке замикання. Фізичний процес виглядає так: при пошкодженні ізоляції фазна напруга потрапляє на корпус, який через PE-провідник з'єднаний з нейтраллю. Утворюється замкнене коло «фаза-нуль» з малим опором, що викликає миттєве зростання струму до величини струму короткого замикання ($I_{кз}$).

Це призводить до спрацювання апаратів струмового захисту:

- Автоматичні вимикачі: електромагнітний розчеплювач миттєвої дії відключає пошкоджену ділянку за час, що не перевищує 0,4 с (для групових мереж 220 В) або 5 с (для розподільчих мереж), що відповідає вимогам ПУЕ.

- Плавкі запобіжники: перегорання плавкої вставки розриває коло живлення.

Критично важливою вимогою є забезпечення безперервності захисного кола. Забороняється встановлювати будь-які комутаційні апарати (вимикачі, запобіжники) у колі PE-провідника, оскільки їх розрив залишить обладнання без захисту.

Як захисні провідники можуть використовуватися спеціально прокладені жили кабелів, сталеві труби електропроводки, алюмінієві оболонки кабелів або металоконструкції будівель (за умови забезпечення надійного електричного контакту). Однак використання робочого нуля (N) як захисного (PE) після точки їх розділення (система TN-C-S) суворо заборонено.

Для мобільного обладнання та ручного інструменту занулення реалізується через окрему жилу в гнучкому кабелі живлення.

- Для однофазних приладів використовується трижильний кабель (Фаза + N + PE).
- Для трифазних — п'ятижильний (3 Фази + N + PE).

При цьому конструкція штепсельних роз’ємів повинна забезпечувати випереджальне замикання заземлювального контакту при включенні та його розмикання в останню чергу при відключенні. Це гарантує, що корпус приладу буде заземлений до моменту подачі на нього напруги.

Крім пасивних методів захисту (ізоляція, заземлення), у сучасних електроустановках обов'язковим є використання активних систем, відомих як захисне вимкнення. Цей швидкодійний вид захисту призначений для автоматичної деенергізації електричного кола (тривалість відключення < 0,1 с) при виникненні аварійних режимів, що загрожують безпеці персоналу.

До таких критичних ситуацій належать:

- прямий дотик людини до струмопровідних частин;
- зниження опору ізоляції нижче допустимого рівня;
- замикання фази на корпус;

- поява небезпечної напруги на заземлених конструкціях.

Основним апаратом реалізації цього захисту є пристрій захисного вимкнення (ПЗВ), що реагує на диференційний струм (струм витоку). Принцип його дії базується на першому законі Кірхгофа: у нормальному режимі векторна сума струмів, що входять у споживач і виходять з нього, дорівнює нулю. При витоку струму на землю (через тіло людини або пошкоджену ізоляцію) баланс порушується. Датчик ПЗВ фіксує цю різницю і миттєво розмикає силові контакти.

Для кіл, що живлять частотні перетворювачі, необхідно використовувати спеціалізовані ПЗВ (типу B або F), стійкі до високочастотних струмів витоку, які генеруються в процесі ШІМ-модуляції.

Специфічним фактором небезпеки у вентиляційних системах є статична електрика. Вона виникає внаслідок трибоелектричного ефекту — тертя діелектричних середовищ (повітря з пилом, пасів передачі, синтетичних матеріалів). Накопичення заряду на ізольованих металевих частинах може призвести до іскрового розряду.

Хоча енергія статичного розряду зазвичай недостатня для смертельного ураження, вона викликає рефлекторну реакцію м’язів (відсмикування), що може призвести до механічних травм при роботі поблизу рухомих частин (лопатей вентилятора, шківів). Крім того, іскра може стати ініціатором вибуху пилоповітряної суміші. Найефективнішим методом захисту є забезпечення еквіпотенціальності — приєднання всіх трубопроводів, кожухів та апаратів до контуру заземлення мінімум у двох точках.

Блискавкозахист поділяється на зовнішній (блискавковідводи для відводу струму прямого удару в землю) та внутрішній. Для захисту напівпровідникової електроніки частотного перетворювача критично важливим є встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП), які обмежують перенапруги, що наводяться в мережі під час грози.

Для забезпечення безпеки під час оперативних перемикань та обслуговування електроустановок персонал повинен використовувати

сертифіковані електрозахисні засоби. За функціональним призначенням їх поділяють на дві категорії:

1. Ізолювальні засоби: забезпечують електричну ізоляцію людини від струмопровідних частин або землі. Вони, у свою чергу, класифікуються за рівнем надійності:
   - Основні засоби: мають ізоляцію, здатну тривалий час витримувати повну робочу напругу установки. Ними дозволяється торкатися до струмопровідних частин під напругою. В установках до 1000 В: діелектричні рукавички, інструмент з ізолювальним покриттям, покажчики напруги. В установках вище 1000 В: ізолювальні штанги, електровимірювальні кліщі.
   - Додаткові засоби: самі по собі не можуть захистити від робочої напруги, але підсилюють дію основних засобів та захищають від напруги кроку. До них належать діелектричні калоші (боти), гумові килимки та ізолювальні підставки.
2. Огороджувальні засоби: Призначені для тимчасового огородження струмопровідних частин, до яких можливий випадковий дотик (щити, ширми, ізоляційні ковпаки), або для заземлення відключених ділянок (переносні заземлення) з метою захисту від помилкової подачі напруги.

Всі засоби захисту підлягають періодичним електричним випробуванням підвищеною напругою з нанесенням штампа про придатність. Використання засобів із простроченим терміном повірки суворо заборонено.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення енергоефективності та надійності роботи електромеханічних систем вентиляції шляхом розробки та дослідження системи частотного керування асинхронним двигуном.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. На основі аналізу механічних характеристик турбомеханізмів встановлено, що для приводу промислового вентилятора оптимальним є застосування скалярного методу керування з реалізацією квадратичної залежності напруги від частоти ($U / f^2 = const$). Доведено, що такий алгоритм, на відміну від лінійного закону ($U / f = const$), дозволяє уникнути надлишкового намагнічування двигуна в режимах неповного завантаження, що мінімізує електричні втрати та підвищує загальний ККД установки.

2. Створено комплексну математичну модель системи «Некерований випрямляч – Ланка постійного струму – Автономний інвертор напруги – Асинхронний двигун» у середовищі MATLAB Simulink. Модель враховує нелінійність напівпровідникових елементів, дискретний характер широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та специфіку аеродинамічного навантаження, потужність якого залежить від куба швидкості ($P \sim \omega^3$).

3. Теоретично обґрунтовано та підтверджено моделюванням доцільність використання просторово-векторної модуляції (SVM) у системі керування інвертором. Встановлено, що порівняно з класичною синусоїдальною ШІМ, метод SVM дозволяє на 15% ефективніше використовувати напругу ланки постійного струму, що є критичним для забезпечення номінального моменту на валу двигуна.

4. Порівняльний аналіз динамічних режимів засвідчив суттєві переваги частотного пуску над прямим підключенням до мережі (DOL). Впровадження розробленої системи плавного пуску забезпечило: зниження амплітуди

пускових струмів у 4,2 раза (з 155 А до 37,5 А), що ліквідує просадки напруги в електромережі підприємства; зменшення пікового електромагнітного моменту у 4,7 раза (з 280 Н·м до 60 Н·м), що усуває ударні навантаження на механічну частину.

5. Отримані осцилограми перехідних процесів демонструють аперіодичний характер розгону без перерегулювання швидкості. Відсутність механічних ударів та обмеження пускових струмів сприяють значному подовженню терміну експлуатації підшипникових вузлів, муфтових з'єднань та ізоляції обмоток статора, а також знижують аварійність вентиляційної системи в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плєшков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.

2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плєшков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.

3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плєшков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.

4. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.

5. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.

6. Electrical Power Systems Quality. Second Edition / R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, W. Beaty. – Boston : McGraw-Hill, 2003. – 525 p.

7. Ahmed A. Zaki Diab et al. (2023). "A Comprehensive Examination of Vector- Controlled Induction Motor Drive Techniques," Energies.

8. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2018, IDT). – [Чинний від 2020–01–01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 130 с.

9. ДСТУ IEC 61800-2:2015. Системи силового електроприводу з регульованою швидкістю. Частина 2. Загальні технічні вимоги. Номінальні параметри (IEC 61800-2:1998, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

10. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок. – [Чинні від 2017–06–01]. – Харків : Форт, 2017. – 760 с.

11. Бешта О. С. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод : навч. посіб. / О. С. Бешта, А. Г. Кіріленко. – Дніпро : НГУ, 2016. – 408 с.

12. Загірняк М. В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.

13. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією : монографія / Г. Г. Півняк, О. С. Бешта, М. М. Бойко. – Дніпропетровськ : НГУ, 2011. – 250 с.

14. Клепіков В. Б. Динаміка електромеханічних систем з нелінійним тертям : монографія / В. Б. Клепіков. – Харків : Підручник НТУ «ХПІ», 2014. – 404 с.

15. Щерба А. А. Енергоефективність електромеханічних систем : навч. посіб. / А. А. Щерба, В. М. Михайленко. – Київ : НУХТ, 2018. – 210 с.

16. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. – New York : Prentice Hall, 2002. – 711 p. (Класика частотного керування).

17. Калінов А. П. Енергозбереження в системах електроприводу турбомеханізмів : монографія / А. П. Калінов, В. В. Прізняков. – Кременчук : КрНУ, 2015. – 180 с.

18. Данфосс ТОВ. Факти, які варто знати про частотне регулювання : довідковий посібник. – Київ : Данфосс, 2019. – 112 с.

19. Попович М. Г. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод : підручник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепіков. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.

20. Черних І. В. Моделювання електротехнічних пристроїв у MATLAB, SimPowerSystems і Simulink / І. В. Черних. – М. : ДМК Прес, 2011. – 288 с.

21. Ong C.-M. Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK / Chee-Mun Ong. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR, 1998. – 626 p.

22. Бурлака В. В. Особливості скалярного керування асинхронним двигуном в зоні низьких частот / В. В. Бурлака, С. В. Поднебенна // Електротехніка та електроенергетика. – 2019. – № 1. – С. 25–32.

23. Колб А. А. Аналіз енергоефективності частотно-регульованого електроприводу насосних та вентиляторних установок / А. А. Колб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. – 2020. – № 3 (1357). – С. 14–19.

24. Петренко О. М. Порівняння методів пуску асинхронних двигунів вентиляційних систем / О. М. Петренко // Енергетика і автоматика. – 2021. – № 5. – С. 45–52.

25. Novotnak B. Energy saving in ventilation systems using VFD / B. Novotnak, J. Hrabovcova // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2018. – Vol. 54. – P. 1120–1126.

26. MathWorks. AC Motor Control with Simulink [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/ac-motor-control.html.