

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Моделювання процесів у електроприводах з асинхронними
двигунами при їх керуванні засобами силової електроніки

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛКп-21
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Георгій ШАРАМБАЙ**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **ст.викл. Е. НЕМЦЕВ**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

_____ (підпис)

_____ (дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

_____ (підпис)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Георгію ШАРАМБАЮ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Моделювання процесів у електроприводах з асинхронними двигунами при їх керуванні засобами силової електроніки

керівник роботи Едуард НЄМЦЕВ, ст.викл.

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна потужність двигуна – 2 кВт.

Синхронна частота обертання – 3000 об./хв. Номінальна фазна напруга живлення двигуна – 380 В. Номінальний струм статора двигуна – 2,4 А.

Частота напруги живлення – 50 Гц. Число фаз – 3. Число пар полюсів двигуна – 2. Число витків у фазі обмотки статора – 392. Обмотковий коефіцієнт – 0,95.

Внутрішній діаметр статора – 82 мм, розмір паза у штампі – 14 мм, довжина вильоту прямолінійної частини котушок з паза від торця осердя до початку відгину лобової частини – 10 мм. Питомий опір матеріалу статорної обмотки – $24 \cdot 10^{-9}$ (Ом·мм²/м). Перетин ефективного провідника $0,4 \cdot 10^{-6}$ м².

Число пазів на полюс і фазу статора – 4. Питомий опір алюмінієвих стрижнів короткозамкненого ротора – $46 \cdot 10^{-9}$ (Ом·мм²/м), перетин стрижня короткозамкненого ротора – $67 \cdot 10^{-6}$ м², довжина стрижня короткозамкненого ротора – 79 мм. Середній діаметр короткозамикаючого кільця – 67 мм. Число пазів ротора – 18. Довжина пазової частини (дорівнює конструктивній довжині осердя) – 79 мм.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд принципів роботи електроприводів.
2. Огляд принципів моделювання електроприводів з силовими електронними пристроями.
3. Розрахунок номінальних параметрів роботи асинхронного двигуна.
4. Моделювання роботи електроприводу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Десять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 5	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 6 травня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	06.05.24 – 12.05.24	
2.	Розділ 2	13.05.24 – 19.05.24	
3.	Розділ 3	20.05.24 – 26.05.24	
4.	Розділ 4	27.05.24 – 09.06.24	
5.	Розділ 5	10.06.24 – 15.06.24	

Студент _____
(підпис)

Георгій ШАРАМБАЙ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Георгій ШАРАМБАЙ. Моделювання процесів у електроприводах з асинхронними двигунами при їх керуванні засобами силової електроніки / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2024.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі наведено загальні відомості про електричні приводи.

У другому розділі було здійснено огляд принципів моделювання електроприводів з силовими електронними пристроями.

У третьому розділі виконано розрахунок номінальних параметрів роботи асинхронного двигуна.

У четвертому розділі було здійснено моделювання роботи електроприводу.

Ключові слова: електропривод, синхронний двигун, силова електроніка, керування, перетворювач, математичне моделювання, програмне забезпечення, методи керування, номінальні параметри, моделювання

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИВОДИ	8
1.1 Значення електроприводів у сучасній промисловості	8
1.2 Роль асинхронних двигунів у функціонуванні електроприводів	10
1.3 Актуальність застосування силової електроніки для удосконалення систем керування двигуном	12
1.4 Проблеми при моделюванні процесів в електроприводах	14
1.5 Проблемні питання при керуванні асинхронними двигунами	16
2 ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З СИЛОВИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПРИСТРОЯМИ	20
2.1 Типи силових електронних перетворювачів, що використовуються в електроприводах	20
2.2 Огляд методів математичного моделювання електроприводів	22
2.3 Засоби моделювання та програмне забезпечення для дослідження поведінки електроприводів	26
2.4 Основні елементи та принцип роботи асинхронних двигунів	28
2.5 Методи керування асинхронними двигунами	31
2.6 Огляд досліджень з моделювання електроприводів	33
3 РОЗРАХУНОК НОМІНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	37
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	45
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	54
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	58
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	66

ВСТУП

Ефективність роботи електричних приводів є критично важливою для сучасної промисловості, транспортних систем та енергетичного сектору. Зокрема, оптимізація параметрів асинхронних двигунів є ключовим напрямом наукових досліджень, оскільки ці двигуни є одними з найпоширеніших у використанні завдяки їх надійності, довговічності та економічності.

Удосконалення методів моделювання та управління електроприводами дозволяє підвищити їх продуктивність, знизити енергоспоживання та покращити експлуатаційні характеристики. Однією з основних задач у цьому напрямі є розробка адекватних математичних моделей, які точно відображають динаміку роботи електроприводів з урахуванням нелінійних характеристик і перехідних процесів. Використання сучасних засобів моделювання, таких як Matlab/Simulink, дозволяє здійснювати комплексний аналіз поведінки системи під різними умовами навантаження, що є необхідним для розробки ефективних стратегій управління.

Дослідження, проведені в рамках цієї роботи, будуть спрямовані на вивчення динамічних режимів роботи асинхронних двигунів, зокрема, їх поведінки при змінних навантаженнях та використанні силовій електроніки для регулювання частоти обертання та крутного моменту. Впровадження таких систем управління дозволяє забезпечити високу точність та швидкість реакції на змінні умови експлуатації, що є критичним для промислових застосувань, де важлива стабільність та ефективність роботи обладнання.

Мета роботи – підвищення ефективності та надійності роботи асинхронних електроприводів з силовими електронними пристроями шляхом застосування методів моделювання.

Завдання роботи:

- розробити адекватні математичні моделі асинхронних електроприводів, що враховують їхні динамічні характеристики,
- дослідити вплив змінних навантажень на роботу асинхронних двигунів,
- розробити та оптимізувати методи управління електроприводами з використанням силових електронних пристроїв,
- впровадити та протестувати сучасні засоби моделювання, такі як Matlab/Simulink, для аналізу поведінки системи,
- визначити ефективність прямого керування крутним моментом для підвищення продуктивності електроприводів.

Об'єкт досліджень – асинхронні електроприводи.

Предмет досліджень – методи та засоби моделювання та управління асинхронними електроприводами з використанням силових електронних пристроїв.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИВОДИ

1.1 Значення електроприводів у сучасній промисловості

Електричні приводи відіграють провідну роль у сучасній промисловості та є основою для широкого спектру застосувань і постачаються системами керування механічним рухом і перетворенням енергії. Електроприводи є умовою підвищення ефективності та продуктивності роботи промислових підприємств та виробництв, транспорту та при виробництві енергії [1].

Розвиток систем електроприводів відзначається безперервним прогресом у технологіях, що дозволило значного покращити їх продуктивність та можливість здійснення відповідного контролю. Впровадження електричних приводів у промисловому застосуванні дозволило покращити контроль процесів виробництва, знизити споживання енергії та підвищити надійність роботи різних систем. Однією з головних переваг електроприводів є їх здатність забезпечити точне керування частотою обертання, крутним моментом і положенням. Задану точність можна забезпечити за допомогою застосування провідних алгоритмів керування та силових електронних пристроїв, які регулюють потік електричної енергії до двигунів [1].

У виробничому секторі електроприводи мають суттєве значення для можливості автоматизації виробничих ліній, що сприяє збільшенню пропускної здатності виробництв та зменшенню частки ручної праці. Електроприводи можуть бути задіяні на різних етапах виробництва, від обробки матеріалів і складання до пакування та розміщення. Використання електроприводів в автоматизованих системах забезпечує високі рівні продуктивності за умов підтримання точності, що є необхідним для виробництва високоякісної продукції. Крім того, використання електроприводів сприяє можливості забезпечення гнучкості виробничих

процесів, дозволяючи швидко коригувати параметри виробництва відповідно до мінливих вимог. Електроприводи є незамінними у транспортній галузі, особливо в контексті їх використання в електромобілях та засобах громадського транспорту. Електроприводи в електромобілів пропонують численні переваги, зокрема вищу енергоефективність, менші викиди та меншу залежність від викопного палива. Перехід до електричних приводів у транспорті узгоджується з глобальними зусиллями по боротьбі зі зміною клімату та сприянню мобільності. Електроприводи в системах залізничного транспорту та метро підвищують ефективність і надійність систем транспорту, підтримуючи їх стійкий розвиток [1].

В енергетичному секторі електроприводи використовуються у вітрових турбінах, гідроелектростанціях та інших системах відновлюваної енергії, відіграючи вирішальну роль в ефективному перетворенні різних видів енергій в електричну енергію. Здатність електроприводів працювати при змінних умовах навантаження та їх сумісність із передовими системами керування роблять їх незамінними при інтеграції відновлюваної енергії в мережу [1].

Важливість електроприводів пояснюється можливістю забезпечення принципів енергозбереження та зниження витрат. Забезпечуючи роботу зі змінною швидкістю та оптимізуючи використання енергії, електроприводи зменшують загальне енергоспоживання промислових систем. Інтеграція електроприводів з інтелектуальними мережами ще більше здатне підвищити їх потенціал для управління потоками енергії та реагування на попит, що призводить до більшої стійкості та ефективності енергетичних систем.

Отже, електроприводи є фундаментальними системами для належного функціонування та сталого розвитку сучасної промисловості. Їх здатність забезпечувати точне керування, підвищувати ефективність і підтримувати сталість виробництв робить їх незамінними в широкому діапазоні

застосувань. Оскільки технологія продовжує розвиватися, електроприводи, безсумнівно, відіграватимуть ще більш важливу роль у формуванні майбутнього промислових процесів і сприятимуть досягненню глобальних цілей сталого розвитку країни.

1.2 Роль асинхронних двигунів у функціонуванні електроприводів

Асинхронні двигуни відіграють одну з головних ролей у широкому спектрі застосувань електроприводів завдяки своїй міцності, надійності та економічності роботи. Асинхронні двигуни працюють за принципом електромагнітної індукції, коли струм у роторі, необхідний для створення крутного моменту, індукується магнітним полем обмотки статора. Їх здатність працювати в складних умовах і вимагати мінімального обслуговування робить їх незамінними як у промислових, так і в комерційних застосуваннях [2].

У промисловому секторі асинхронні двигуни широко використовуються в електроприводах, коли вимагається стала та надійна робота. Вони використовуються у приводах конвеєрів, насосів, вентиляторів, компресорів та іншого енергетичного обладнання, яке є компонентами виробничих підприємств. Висока ефективність роботи та довговічність асинхронних двигунів роблять їх ідеальними для тривалої роботи в суворих умовах, коли спостерігається коливання навантаження і температури та важкі умови роботи на гірничих та нафто- і газовидобувних та переробних підприємствах, при виробництві сталі та інших [2].

Універсальність асинхронних двигунів ще яскравіше може бути продемонстрована в транспортній галузі. Вони є невід'ємною частиною функціонування електропоїздів, трамваїв та інших видів

електротранспорту. Міцність цих двигунів забезпечує надійну роботу протягом тривалого часу, що є критичним для систем громадського транспорту, які потребують тривалого часу безвідмовної роботи та низьких витрат на обслуговування. Крім того, здатність рекуперативного гальмування асинхронних двигунів дозволяє рекуперувати енергію під час уповільнення, підвищуючи загальну енергоефективність електромобілів і систем громадського транспорту.

У сфері відновлюваної енергетики асинхронні двигуни використовуються у вітрових турбінах і малих гідроелектростанціях. У вітрових турбінах вони перетворюють кінетичну енергію вітру в електричну енергію, яка потім подається в мережу. Здатність асинхронних двигунів ефективно працювати в широкому діапазоні частот обертання робить їх добре придатними для використання при змінних швидкостях вітру. На гідроелектростанціях ці двигуни приводять у дію водяні насоси, які підтримують потік води через турбіни, забезпечуючи безперервне виробництво електроенергії [2].

Не оминуло використання асинхронних двигунів і комунальний сектор – вони зазвичай використовуються в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, які необхідні для підтримки належного мікроклімату в приміщеннях і комфорту в будівлях. Їхня ефективність і надійність знижують експлуатаційні витрати зазначених систем, що часто робить їх кращим вибором.

У сільськогосподарському секторі асинхронні двигуни використовуються в різних механізованих процесах: живлять іригаційні насоси, зернові елеватори та кормові конвеєри. Простота та довговічність асинхронних двигунів дозволяють їм надійно працювати у віддалених місцях, де можливості технічного обслуговування можуть бути обмеженими.

Окрім практичного застосування, асинхронні двигуни зіграли ключову роль у розвитку технологій керування двигунами. Вони служать

«випробувальним майданчиком» для розробки складних алгоритмів керування, таких як векторне керування та пряме керування крутним моментом, які покращують продуктивність та ефективність електроприводів. Ці досягнення призвели до підвищення точності керування та економії енергії в багатьох енергетичних системах.

Отже, асинхронні двигуни є невід'ємною частиною різноманітних застосувань у багатьох галузях завдяки своїй надійності, ефективності та адаптивності. Їх здатність працювати в різних умовах з мінімальним обслуговуванням робить їх кращим вибором у промисловості, транспорті, відновлюваній енергетиці, комерційному та сільськогосподарському секторах. Оскільки технологія продовжує розвиватися, очікується, що роль асинхронних двигунів у стимулюванні інновацій та ефективності в цих галузях зростатиме, що ще більше посилить їхню важливість у сучасних енергетичних системах.

1.3 Актуальність застосування силової електроніки для удосконалення систем керування двигуном

Силова електроніка може відігравати провідну роль у змісті покращення керування двигуном, для підвищення ефективності, продуктивності та гнучкості систем електроприводів. Інтеграція силової електроніки у системи керування двигуном покращила роботу двигунів, забезпечила більш точне регулювання частоти обертання, крутного моменту та положення [3].

Основне значення силової електроніки в управлінні двигуном полягає в їх здатності ефективно перетворювати та регулювати потік електричної енергії. Силкові електронні пристрої, такі як інвертори, перетворювачі та випрямлячі, використовуються для керування живленням двигунів,

гарантуючи їх роботу в оптимальних умовах. Керуючи величиною напруги та струму двигуна, ці пристрої можуть регулювати продуктивність двигуна в режимі реального часу, тим самим покращуючи загальну ефективність електроприводів. Ця здатність має важливе значення для зменшення споживання енергії та експлуатаційних витрат [3].

Одним із ключових досягнень силової електроніки є розробка приводів із змінною частотою, які дозволяють точно контролювати частотою обертання двигуна шляхом регулювання частоти та напруги живлення, що подається на двигун. Ця технологія особливо корисна для електроприводів, які працюють зі змінною частотою обертання. Можливість точного налаштування частоти обертання двигуна покращує контроль технологічних процесів, підвищує продуктивність і зменшує механічне навантаження на двигуни, подовжуючи тим самим термін їх служби.

Використання силової електроніки забезпечує вдосконалення методів контролю крутного моменту. Загалом це забезпечується шляхом використання складних алгоритмів, які використовують силові електронні пристрої для досягнення точного регулювання крутного моменту в асинхронних двигунах. Ці методи відокремлюють керування крутним моментом двигуна та струмом, дозволяючи швидше та точніше реагувати на динамічні зміни навантаження. Реалізація цих стратегій управління призводить до покращення продуктивності, вищої ефективності та зменшення втрат енергії, що робить їх дуже актуальними для електроприводів, які вимагають високої динамічної продуктивності [3].

Розвиток напівпровідникових технологій привів до розробки високоефективних і компактних силових електронних пристроїв. Напівпровідникові пристрої з карбіду кремнію (SiC) і нітриду галію (GaN) мають чудові робочі характеристики: більш висока номінальна робоча напруга, більша швидкість перемикання та менші втрати потужності порівняно з традиційними пристроями на основі кремнію. Застосування

цих напівпровідникових пристроїв у силовій електроніці ще більше підвищує ефективність і надійність систем керування двигунами, створюючи більш компактні й енергоефективні електроприводи [4].

Отже, актуальність огляду питань застосування сигової електроніки для покращення керування двигуном підкреслюється їх здатністю підвищувати ефективність, продуктивність і гнучкість у системах електроприводів. Завдяки точному регулюванню електричної потужності силова електроніка забезпечує передові методи керування, полегшує інтеграцію відновлюваних джерел енергії та підтримує розробку компактних і ефективних систем керування двигунами.

1.4 Проблеми при моделюванні процесів в електроприводах

Моделювання процесів в електроприводах створює численні проблеми через складність і динамічний характер поведінки цих систем. Електроприводи, які перетворюють електричну енергію в механічний рух, передбачають досить складну взаємодію між електричними та механічними компонентами, що вимагає створення комплексних моделей, які точно відображають зазначені взаємодії. Проблеми можна розділити на категорії, пов'язані з фізичним моделюванням компонентів, інтеграцією систем керування, обробкою нелінійностей та обчислювальними вимогами до моделювання.

Однією з головних проблем при моделюванні електроприводів є точне представлення задіяних фізичних компонентів. Це стосується самого двигуна, сигової електроніки та навантажень. Кожен компонент має унікальні характеристики, які повинні бути зафіксовані в моделі. Асинхронні двигуни потребують детального моделювання їх електромагнітної поведінки, враховувати взаємодію між полями статора та

ротора. Зазначене передбачає розв'язування складних диференціальних рівнянь, що описують поведінку двигуна при різних умовах роботи. Силові електронні пристрої генерують динамічні перемикання, що мають бути представлені досить вірно [5].

Іншою важливою проблемою є інтеграція систем керування з фізичною моделлю. Електричні приводи зазвичай керуються за допомогою алгоритмів, що регулюють частоту обертання та крутний момент. Це забезпечується шляхом різноманітних стратегій керування. Зокрема, векторне (пряме) керування крутним моментом, покладаються на зворотний зв'язок у реальному часі та налаштування для підтримки оптимальної продуктивності. Моделювання таких систем керування вимагає глибокого розуміння як динаміки поведінки двигуна, так і алгоритмів керування. Взаємодія між системою керування та двигуном може створити додаткові складності, оскільки дії контролера можуть впливати на поведінку двигуна певним чином, що має бути точно відображено в моделі [5].

Наявна нелінійність також є однією серйозною проблемою при моделюванні електроприводів. Багато компонентів і явищ в електроприводі мають нелінійну поведінку (магнітне насичення в осерді двигуна, тертя в механічних компонентах, характеристики перемикання силової електроніки та інше). Ці нелінійності ускладнюють процес математичного моделювання, оскільки лінійні наближення часто не в змозі відобразити справжню поведінку системи. Для точного моделювання цих нелінійностей потрібні передові математичні та чисельні методи. Це часто включає ітераційні методи та використання складних програмних засобів, які можуть впоратися з обчислювальною вимогою розв'язання нелінійних рівнянь [6].

Детальні моделі, які точно відображають динаміку електроприводів, можуть потребувати інтенсивних (потужних) обчислень та вимагають значної обчислювальної потужності та пам'яті. Забезпечення високої

точності, яка може бути необхідною для перевірки стратегій керування та прогнозування поведінки системи за різних умов, що може потребувати багато часу та ресурсів обчислювальної техніки. Це може викликати особливі складності, коли потрібно здійснювати моделювання в реальному часі, коли створена модель також має працювати в режимі реального часу, щоб реалізовувати відповідну взаємодію з фізичними компонентами електроприводами [7].

Змінність робочих умов додає ще один рівень складності моделюванню електроприводів. Ці системи часто працюють у широкому діапазоні умов, включаючи різні навантаження, частоти обертання та фактори навколишнього середовища. Розробка надійних і точних моделей у всіх цих умовах є складним завданням. Це також вимагає ретельної перевірки та тестування, щоб гарантувати, що моделі можуть надійно передбачити поведінку системи [6].

Отже, моделювання процесів в електроприводах є складним завданням, яке передбачає точне представлення фізичних компонентів, інтеграцію систем керування, обробку нелінійностей та керування обчислювальними вимогами. Кожен із цих викликів потребує складних методів моделювання та глибокого розуміння основних фізичних принципів. Подолання цих проблем має важливе значення для розробки ефективних і надійних систем електричного приводу, які мають вирішальне значення для різних застосувань.

1.5 Проблемні питання при керуванні асинхронними двигунами

Під час керування асинхронними двигунами можуть виникнути певні проблеми, які впливають з властивостей самих двигунів, їх характеристик та умов експлуатації. Ефективне керування цими двигунами вимагає

вирішення різних проблем: контроль ковзання, підтримка динамічних характеристик, наявність нелінійності, чутливість до зовнішніх впливів і підтримка та оптимізація встановлених параметрів ефективності [8].

Ковзання визначає різницю між синхронною частотою обертання магнітного поля та фактичною частотою обертання ротора. Ковзання відіграє важливу роль для створення крутного моменту в асинхронних двигунах, але воно ускладнює керування, оскільки може змінюватися залежно від умов навантаження. Підтримка оптимального значення ковзання здатне забезпечити ефективну та стабільну роботи, що вимагає впровадження складних алгоритмів керування. Традиційні скалярні методи керування, такі як керування напругою і частотою напруги (точніше – їх відношенням – U/f), є відносно простим способом, але недостатнім для здійснення та забезпечення точного керування, особливо в умовах навантаження, що змінюється динамічно [8].

Асинхронні двигуни за своєю суттю є нелінійними системами, і їх реакція на зміну частоти обертання, навантаження та інших робочих умов може бути досить складною. Забезпечення швидкої та точної реакції на вхідні дані керування має важливе значення для багатьох електроприводів, де необхідне точне керування рухом. Для вирішення цих проблем використовуються передові методи керування – векторне керування і пряме керування крутним моментом. Ці методи забезпечують покращену динамічну продуктивність шляхом відокремлення контролю крутного моменту та магнітного потоку, що забезпечує більш точне та чутливе керування. Нелінійність у асинхронних двигунах виникає через різноманітні фактори: зміна магнітного насичення, змінна опору ротора в процесі роботи та вплив коливань температури. Ця нелінійна поведінка ускладнює розробку точних моделей і стратегій керування, які можуть працювати в широкому діапазоні робочих параметрів. З огляду на це, системи керування мають бути достатньо надійними, щоб мати змогу враховувати ці нелінійності без шкоди для продуктивності чи стабільності

роботи приводів. Це вимагає використання передових методів моделювання та адаптивних алгоритмів керування, які можуть пристосовуватися до змінних параметрів двигуна в режимі реального часу. Продуктивність алгоритмів керування значною мірою залежить від точного знання параметрів двигуна, таких як опір ротора, індуктивність статора та взаємна індуктивність. Ці параметри можуть змінюватися в залежності від величини допусків при конструюванні, старінні та умов експлуатації. Неточна оцінка параметрів може призвести до неоптимальної продуктивності та навіть нестабільності функціонування системи керування. Впровадження методів оцінки параметрів і адаптивного контролю має важливе значення для зменшення впливу цих ефектів [8].

Досягнення оптимальної ефективності також може створити проблему для можливості керування асинхронним двигуном. Робота двигуна з оптимальною ефективністю вимагає збалансування різних факторів, зокрема — ковзання, навантаження та частоти обертання. Неефективне керування може призвести до надмірного споживання енергії та збільшення експлуатаційних витрат. Удосконалені стратегії керування, такі як безсенсорне керування та прогнозне керування за моделлю, дозволять забезпечити оптимізацію ефективності двигуна шляхом постійного коригування параметрів керування на основі робочих умов у реальному часі.

Коли електроприводи містять інтеграцію асинхронних двигунів з силовими електронними перетворювачами створюються додаткові проблеми керування. Силова електроніка забезпечує гарантовану гнучкість для здійснення точного керування частотою обертання двигуна та крутним моментом, але також створює додаткові проблеми — гармоніки, втрати при перемиканні та електромагнітні перешкоди. Вирішення цих проблем вимагає ретельного проектування та впровадження системи керування, яка б забезпечила повну реалізацію переваг сигової електроніки без шкоди для продуктивності та надійності двигуна [9].

Отже, керування асинхронними двигунами передбачає вирішення кількох конкретних проблем, пов'язаних із керуванням ковзанням, динамічними характеристиками, нелінійністю, чутливістю параметрів та оптимізацією ефективності. Удосконалені методи керування та адаптивні алгоритми необхідні для подолання цих проблем і досягнення точної, надійної та ефективної роботи двигуна.

2 ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З СИЛОВИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПРИСТРОЯМИ

2.1 Типи силових електронних перетворювачів, що використовуються в електроприводах

Силові електронні перетворювачі є ключовими компонентами в електроприводах і сприяють ефективному та точному управлінню. Ці перетворювачі, до яких відносять випрямлячі, інвертори, чоппери та циклоконвертори, відіграють ключову роль у перетворенні та регулюванні електроенергії для задоволення конкретних вимог різних режимів роботи двигунів. Кожен з цих типів перетворювача виконує різні функції та пропонує унікальні переваги, що робить їх придатними для різноманітних промислових, комерційних і житлових застосувань [9].

Випрямлячі є найбільш розповсюджених типів силових електронних перетворювачів, що використовуються в електроприводах. Вони перетворюють змінний струм на постійний, створюючи необхідне джерело постійного струму для наступних етапів перетворення електричної енергії. Випрямлячі поділяють на некеровані та керовані. Некеровані випрямлячі, які зазвичай використовують діоди, забезпечують фіксоване значення постійного струму. Керовані випрямлячі використовують такі пристрої, як кремнієві випрямлячі, і дозволяють регулювати вихідну напругу шляхом контролю фазового кута вхідного змінного струму [10].

Інвертори також є досить розповсюдженими силовими електронними перетворювачами і перетворює постійний струм у змінний. Вони дозволяють контролювати частоту обертання і крутний момент двигуна змінного струму шляхом зміни частоти та амплітуди вихідної напруги змінного струму. Існують кілька типів інверторів: інвертори джерел напруги, інвертори джерел струму і багаторівневі інвертори [10].

Переривачі (чоппери), відомі як перетворювачі постійного струму, використовуються для перетворення постійної напруги постійного струму в змінну напругу постійного струму. Вони відіграють важливу роль у приводах, що вимагають точного керування швидкістю та крутним моментом двигуна постійного струму. Їх можна розділити на понижуючі та підвищуючі перетворювачі, які відповідно знижують вхідну напругу постійного струму до необхідного рівня та збільшують вхідну напругу [10].

Циклоконвертери використовуються в електроприводах, особливо високої потужності. Вони безпосередньо перетворюють потужність змінного струму з однієї частоти на іншу без проміжного каскаду постійного струму та забезпечити змінну вихідну частоту від входу з фіксованою частотою. Їхня здатність забезпечувати плавне та безперервне керування швидкістю та крутним моментом двигуна є їх перевагою [10].

Матричні перетворювачі стали альтернативою традиційним циклоконверторам і інверторам. Ці перетворювачі забезпечують пряме перетворення змінного струму в змінний з можливістю керування як амплітудою, так і частотою вихідної напруги. Матричні перетворювачі пропонують такі переваги, як зменшення розміру та ваги, більш високу ефективність і покращену якість електричної енергії [10].

Отже, силові електронні перетворювачі є невід'ємною частиною роботи та керування електроприводами, забезпечуючи ефективне та точне регулювання електричної енергії. Випрямлячі, інвертори, чоппери, циклоконвертери та матричні перетворювачі виконують певні функції, задовольняючи різноманітні вимоги різних застосувань двигунів. Оскільки технологія продовжує розвиватися, розробка та оптимізація цих перетворювачів відіграватиме вирішальну роль у підвищенні продуктивності та ефективності систем керування двигуном у різних галузях.

2.2 Огляд методів математичного моделювання електроприводів

Розробка підходів до математичного моделювання електроприводів є основними завданням для розуміння та прогнозування поведінки цих систем у різних умовах експлуатації. Ці моделі здатні забезпечити теоретичну основу, яку можна використати для проектування, аналізу та оптимізації систем електроприводу, що містять електродвигун і відповідні силові електронні перетворювачі [11].

Одним з основних підходів до математичного моделювання електроприводів є використання диференціальних рівнянь. Цей метод передбачає отримання та використання рівнянь, що відображають динаміку роботи електродвигуна та силових електронних компонентів. Динамічну поведінку асинхронного двигуна можна описати набором диференціальних рівнянь, які враховують напругу, струми та потокозчеплення статора й ротора. Ці рівняння зазвичай виражаються в системі відліку осей, що обертаються, і спрощує аналіз шляхом перетворення трифазних змінних у дві ортогональні складові. Це перетворення полегшує аналіз поведінки двигуна та стратегії управління приводом [12].

Рівняння для асинхронного двигуна виводяться з рівнянь, складених за законом Кірхгофа для кожної фаз статора і ротора. При приведенні змінних статора до осей, що обертаються разом з полем статора, також приводяться до осей, що обертаються, складові струмів ротора. Вигляд цих диференціальних рівнянь в осях «d» і «q» мають вигляд [13]:

$$p\psi_{da} = \omega_{\delta}(U_d + \psi_{qa} - r_a i_{da}), \quad (2.1)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання,

ψ_{da} – поздовжнє потокозчеплення статора,

ω_δ – базова величина колової частоти обертання, за яку можна приймати номінальну частоту обертання: $\omega_\delta = \omega_H$,

U_d – складова напруги мережі по осі d,

ψ_{qa} – поперечне потокозчеплення статора,

r_a – активний опір статора двигуна,

i_{da} – складова струму статора двигуна по осі d [13]:

$$i_{da} = \frac{1}{(1-\mu)x_a} \psi_{da} - \frac{1}{(1-\mu)x_a} \psi_{rda}, \quad (2.2)$$

$$p\psi_{qa} = \omega_\delta (U_q - \psi_{da} - r_a i_{qa}), \quad (2.3)$$

де U_q – складова напруги мережі по осі q,

i_{qa} – складова струму статора двигуна по осі q:

$$i_{qa} = \frac{1}{(1-\mu)x_a} \psi_{qa} - \frac{1}{(1-\mu)x_a} \psi_{rqa}, \quad (2.4)$$

$$p\psi_{rda} = -\frac{1}{T_{ra}} \psi_{rda} + \frac{\mu x_a}{T_{ra}} i_{da} + \omega_\delta \psi_{rqa} (\omega_c - \omega_a), \quad (2.5)$$

де ψ_{rda} – поздовжнє і поперечне потокозчеплення ротора,

T_{ra} – електрична постійна часу ротора,

μ – коефіцієнт магнітного зв'язку між статором і ротором,

x_a – реактивний опір статора двигуна,

ω_c – колова швидкість, що відповідає частоті мережі,

ω_a – колова швидкість обертання двигуна,

$$p\omega_a = \frac{1}{T_{ja}} (M_{sa} - M_{ca}), \quad (2.6)$$

T_{ja} – постійна часу від механічної інерції,

M_{ea} – крутний момент на валу двигуна,

M_{ca} – момент опору на валу двигуна,

$$M_{ba} = \psi_{da} i_{qa} - \psi_{qa} i_{da} \quad (2.7)$$

Для зручності дослідження поведінки асинхронного двигуна використовується схема заміщення (рис. 2.1). Заводи-виробники асинхронних двигунів у технічному паспорті наводять параметри елементів на схемі заміщення, з урахуванням яких можна визначати коефіцієнти диференціальних рівнянь.

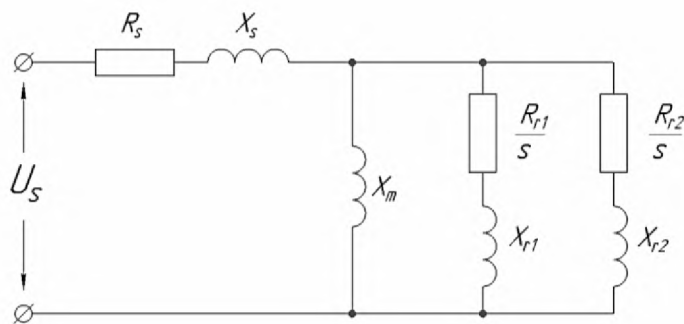


Рисунок 2.1 – Схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Використання схем заміщення також може бути одним з підходів до здійснення математичного моделювання. Ці моделі представляють двигун і його компоненти за допомогою елементів електричного кола і може забезпечити доступність аналізу стаціонарної та перехідної поведінки двигуна, що може бути корисним як для проектування, так і для визначення способів керування [13].

Ще одним потужним методом може бути моделювання простору станів, який передбачає представлення динаміки системи через змінні стану та їх похідні за часом. Модель простору станів зазвичай виражається у матричній формі, що дозволяє застосовувати методи лінійної алгебри для

здійснення аналізу. Моделі простору станів можуть бути особливо корисними для розробки розширених стратегій керування – оптимального чи прогнозного керування моделлю. Ці моделі дають змогу визначати як лінійну, так і нелінійну динаміку системи, що робить їх універсальними інструментами для широкого спектру застосувань.

Метод кінцевих елементів – це ще один з підходів чисельного моделювання, і який може бути використаний для розв’язання складних рівнянь, що описують форму і стан електромагнітного поля, що визначає поведінку електроприводів. При даному методі просторова геометрія двигуна «розбивається» на кінцеву кількість елементів і розв’язання електромагнітних рівнянь здійснюють для кожного такого елемента. Цей метод може забезпечити високоточні результати та може враховувати складну геометрію та різні властивості матеріалів. Даний метод може бути особливо корисним для аналізу електромагнітних характеристик двигуна: магнітного насичення, втрат в осерді та розподіл температурних полів [14].

У якості нового підходу до моделювання електроприводів можуть бути застосовані методи машинного навчання, які передбачають навчання алгоритмів на даних, зібраних з аналогічних систем та приводів, для розробки прогнозних моделей. Моделі машинного навчання можуть визначати складні нелінійні зв’язки та взаємодії, які важко моделювати з використанням традиційних методів. Такі моделі можуть бути використані для виявлення несправностей, прогнозного обслуговування та запровадження адаптивного керування [15].

Різні підходи до математичного моделювання електроприводів можуть охоплювати цілий ряд методів, включаючи диференціальні рівняння, моделі еквівалентних схем, моделі простору станів, аналіз кінцевих елементів і машинне навчання. Кожен підхід пропонує унікальні переваги та підходить для різних аспектів аналізу двигуна окремо та системи приводу в цілому.

2.3 Засоби моделювання та програмне забезпечення для дослідження поведінки електроприводів

Інструменти моделювання та програмне забезпечення відіграють вирішальну роль у моделюванні та аналізі електроприводів, дозволяючи належним чином здійснювати проектування, оптимізацію та перевірку роботи електроприводів з високою точністю та ефективністю. Ці інструменти пропонують ряд можливостей, від базового моделювання схеми до можливості вдосконаленого аналізу електромагнітного поля та тестування системи керування в реальному часі. Використовуючи програмне забезпечення для моделювання можна скоротити час розробки, знизити витрати та підвищити надійність роботи електроприводів.

Одним із найбільш широко використовуваних засобів моделювання електроприводів є програма Matlab/Simulink. Matlab – це мова та середовище програмування високого рівня, у поєднанні з Simulink, що є інструментом моделювання блок-схем, забезпечує потужну платформу для моделювання та імітації динамічних систем. Simulink дозволяє графічно представляти системи електроприводів – безпосередньо двигуни, силові електронні перетворювачі та алгоритми керування. Велика та потужна бібліотека готових компонентів і функцій робить його придатним як для освітніх, так і для промислових застосувань. Matlab/Simulink особливо ефективні для розробки стратегій керування, виконання моделювання на системному рівні та проведенні аналізу чутливості [16].

Іншим інструментом моделювання є програмне середовище «Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation» (PLECS), яке було спеціально розроблено для силовій електроніки та електроприводів. PLECS легко інтегрується з Matlab/Simulink і надає можливість використання спеціалізованих компонентів для моделювання силових електронних схем, електричних машин і систем управління температурою. Воно чудово

моделює поведінку перемикання силових електронних пристроїв, що робить його ідеальним інструментом для аналізу продуктивності та ефективності систем електроприводу в різних робочих умовах. PLECS також підтримує симуляцію в реальному часі, уможливорюючи тестування обладнання за цикл роботи, що є важливим для перевірки алгоритмів керування та забезпечення надійності системи [17].

ANSYS Maxwell – це провідне програмне забезпечення для аналізу кінцевих елементів, що використовується для моделювання електромагнітного середовища електричних машин. Програмне забезпечення надає детальну інформацію про електромагнітну поведінку двигунів: розподіл магнітного потоку, вихрові струми та втрати в осерді. Можливості точного моделювання дозволяють оптимізувати конструкції двигуна, що призводить до покращення продуктивності та ефективності. ANSYS Maxwell часто використовується в поєднанні з іншими інструментами ANSYS, такими як ANSYS Fluent для теплового аналізу та ANSYS Mechanical для структурного аналізу, щоб забезпечити комплексне середовище моделювання для систем електроприводу [18].

Програмний інструмент PSCAD використовується для моделювання енергетичних систем і електромагнітних перехідних процесів. PSCAD дозволяє створювати детальні моделі силових електронних перетворювачів і електричних машин для здійснення аналізу їх динамічної поведінки. Він надає можливості моделювання в реальному часі та широко використовується для досліджень на системному рівні [19].

Спеціалізоване програмне забезпечення JMAG може бути використане для виконання електромагнітного та теплового аналізу електричних машин. JMAG забезпечує високоточне моделювання магнітних полів, втрат і розподілу температури, що дозволяє детально проектувати та оптимізувати двигуни. Розширені можливості постобробки дозволяють проводити ретельний аналіз результатів моделювання, полегшуючи ідентифікацію вдосконалень конструкції [20].

Середовище Sabre від Synopsys є ще одним універсальним інструментом моделювання, який використовується для моделювання та аналізу фізичних систем, таких як електроприводи. Sabre підтримує багатогранне моделювання, дозволяючи інтегрувати електричні, механічні та теплові моделі в одне середовище. Його здатність моделювати складні взаємодії між різними областями робить його цінним інструментом для цілісного аналізу та оптимізації систем електроприводу [20].

Отже, у якості засобів моделювання та програмного забезпечення для аналізу роботи електроприводів можуть бути використані наступні продукти: Matlab/Simulink, PLECS, ANSYS Maxwell, PSCAD, Sabre та JMAG. Вони пропонують унікальні функції та можливості, які забезпечують різні аспекти моделювання електроприводів. Використовуючи ці інструменти можна досягти глибшого розуміння поведінки системи, підвищити ефективність проектування та забезпечити надійність і продуктивність систем електроприводу в різних застосуваннях.

2.4 Основні елементи та принцип роботи асинхронних двигунів

Асинхронні двигуни є одними з найрозповсюдженіших в сучасному промисловому виробництві завдяки своїй конструктивній міцності, простоті та економічності. Розуміння їх конструктивних особливостей та принципу роботи, а також складання відповідних еквівалентних схем заміщення є досить важливим для ефективного застосування та контролю роботи цих електричних машин [21].

Конструктивно асинхронний двигун складається з двох основних частин: статора і ротора. Статор є нерухомою частиною двигуна і складається з багат шарового залізного осердя з пазами, в яких

розташовані обмотки статора. Ці обмотки зазвичай виготовляються з ізолюваного мідного або алюмінієвого дроту та розподіляються симетрично навколо осі осердя статора для створення збалансованої трифазної системи обмоток. Коли на обмотки статора подається трифазний змінний струм, створюється обертальне магнітне поле. Ротор – це частина двигуна, що обертається, і знаходиться всередині статора. Існує два типи роторів: короткозамкнений ротор («біляча клітка») і фазний ротор. Ротор із короткозамкненим ротором є найпоширенішим типом і складається з ламінованого залізного осердя з паралельними пазами, що містять провідні шини, як правило, виготовлені з міді або алюмінію, і які електрично замкнені з обох кінців кінцевими кільцями для утворення замкнутого контуру. Фазний ротор має трифазну обмотку, подібну до обмотки статора, і яка з'єднується із зовнішнім ланцюгом опорів через контактні кільця, що дозволяє змінювати природні характеристики двигуна (рис. 2.2) [21, 22].

Принцип роботи асинхронного двигуна заснований на законах електромагнітної індукції. Коли обмотки статора приєднуються до трифазного джерела змінного струму, створюється магнітне поле, що обертається. Це поле обертається з синхронною швидкістю, яка визначається частотою напруги живлення та кількістю полюсів в обмотці статора. Коли обертальне магнітне поле перетинає провідники ротора, у його обмотці генерується електрорушійна сила (ЕРС) у відповідності до закону електромагнітної індукції. Ця ЕРС генерує струми в провідниках (обмотках) ротора, що взаємодіють з магнітним полем, створюючи крутний момент, який змушує ротор обертатися. Ротор не досягає значення синхронної швидкості і трохи відстає, що призводить до відносної різниці швидкості, відомої як ковзання. Ковзання має важливе значення для створення крутного моменту в асинхронних двигунах – величина ковзання залежить від навантаження на двигун – зі збільшенням навантаження ковзання збільшується, що призводить до генерації більшого струму в роторі, таким чином створюючи більший крутний момент [21].

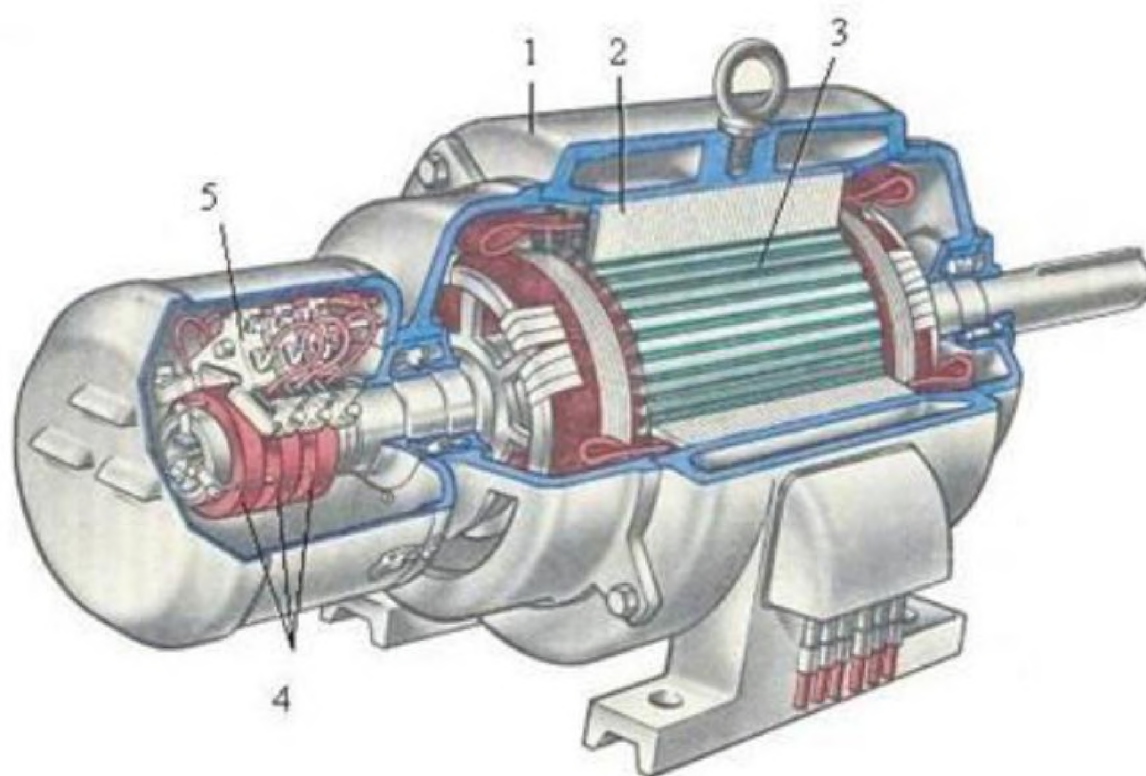


Рисунок 2.2 – Складові частини асинхронного двигуна з фазним ротором: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактні кільця, 5 – щітковий механізм

Модель еквівалентної схеми асинхронного двигуна (рис. 2.1) є спрощеним представленням, яке допомагає аналізувати його роботу в різних умовах експлуатації. Ця модель враховує та відображає електричні та магнітні властивості двигуна. У еквівалентній схемі обмотка статора представлена послідовно з'єднаними опором (R_s) і реактивним опором витoku (X_s), що враховує резистивні втрати та індуктивний опір обмоток статора. Ротор представлений активним опором ротора (R_r) і реактивним опором ротора (X_r), віднесеним до обмотки статора, що враховується значенням ковзання (s). Гілку намагнічування представлено реактивним опором намагнічування (X_m), включеним паралельно до ланцюга ротора, і таким, що реалізує струм намагнічування, необхідний для створення обертового магнітного поля і враховує втрати в осерді через гістерезис і вихрові струми.

Коли асинхронний двигун працює без навантаження, ковзання мінімальне, що призводить до незначних величин роторних струмів та мінімальних втрат. Зі збільшенням навантаження збільшується ковзання, відповідно зростають струми і втрати в роторі, що означає зростання споживання потужності та величини крутного моменту. Еквівалентна схема може надати цінну інформацію про робочі характеристики асинхронних двигунів, визначити його ефективність, розрахувати коефіцієнт потужності, величину крутного моменту та струми в обмотках. Це допомагає зрозуміти вплив змінних умов навантаження, коливань напруги та частоти та інших робочих параметрів, полегшуючи розробку та оптимізацію стратегій керування двигуном для підвищення продуктивності та ефективності в різних електроприводах [23].

2.5 Методи керування асинхронними двигунами

Методи керування асинхронних двигунів направлені на оптимізацію їх роботи для різних умов навантаження. Усі метод керування можна поділити на скалярні та векторні, кожен з яких має різні принципи та область застосування.

Скалярні методи керування є одними з найпростіших і найбільш широко використовуваних методів керування асинхронними двигунами. Основним принципом скалярного керування є підтримка постійного співвідношення між напругою статора та частотою напруги живлення, що забезпечує постійність магнітного потоку в двигуні. Такий підхід спрощує процес керування та забезпечує стабільну роботу двигуна в широкому діапазоні частот обертання. При скалярному керуванні частота обертання двигуна регулюється шляхом зміни частоти живлення з одночасною зміною величини напруги статора для підтримки співвідношення « U/f ».

Цей метод особливо ефективний для електроприводів, де точність регулювання частоти обертання не є критичною. Перевагою скалярного керування є його простота та легкість впровадження, що робить його досить економічним рішенням для багатьох промислових приводів. При цьому існують певні обмеження щодо динамічних характеристик і ефективності керування, особливо при змінних умовах навантаження, оскільки не враховується внутрішня динаміка двигуна та взаємодія магнітних потоків [24].

Методи векторного керування, також відоме як просторово-орієнтоване керування, мають можливості більш точного керування асинхронними двигунами у ширшому діапазоні, що досягається шляхом роз'єднання контурів керування крутним моментом та контурів струмів у двигуні. Такий підхід дозволяє здійснювати незалежне керування магнітним полем двигуна та струмом, що створює крутний момент. Це забезпечує кращі динамічні характеристики та ефективність у порівнянні зі скалярними методами керування. При векторному керуванні реалізується перетворення трифазних струмів статора (система трьох координат) в двоосьову систему координат (ті, що обертаються) за допомогою математичних перетворень. У цій новій системі координат компонент двигуна, що створює потік (вздовж осі d), і компонент, що створює крутний момент (вздовж осі q), можуть керуватися незалежно. Регулюючи ці компоненти окремо, векторне керування забезпечує швидку та точну реакцію на зміни навантаження та частоти обертання, що робить його добре придатним для приводів, що вимагають забезпечення зазначених вимог [24].

І скалярний, і векторний методи керування мають відповідні переваги та застосування. Скалярне керування користується перевагою через його простоту та економічну ефективність у електроприводах, де точне керування швидкістю та крутним моментом не є критичним. Навпаки, методи векторного керування пропонують чудову продуктивність і

точність, що робить їх ідеальними для високопродуктивних і динамічних приводів.

2.6 Огляд досліджень з моделювання електроприводів

У [25] представлено дослідження, спрямоване на підвищення ефективності систем транспортування з використанням стрічкових конвеєрів. Основною метою роботи була оптимізація роботи стрічкових конвеєрів на гірничих роботах за рахунок впровадження асинхронних короткозамкнених двигунів і різних схем електроприводів. У дослідженні було здійснено оцінку продуктивності конвеєрних систем шляхом вивчення структури, механізмів приводу та можливих конфігурацій, що включають статичні перетворювачі напруги та частоти. Автори виділяють переваги асинхронних двигунів, пов'язані з їх механічною міцністю та простотою обслуговування. Значна частина дослідження включає створення імітаційної моделі з використанням Matlab і його розширень – Simulink і SimPowerSystems, щоб відтворити динамічну поведінку електричних приводів конвеєра. Симуляція охоплює різні перехідні процеси, такі як пуск, регулювання частоти обертання та принципів гальмування, надаючи цінну інформацію про ефективність та пошук потенціалу для покращення роботи електроприводів з асинхронними двигунами. Результати підкреслюють ефективність використання технології IGBT у системах приводу та корисність чисельного моделювання для прогнозування та підвищення продуктивності електроприводів високої потужності в конвеєрних системах. У дослідженні зроблено висновок, що застосовані вдосконалені методи моделювання пропонують надійний метод досягнення оптимальних умов експлуатації систем транспортування.

У [26] розглянуто поведінку низьковольтних асинхронних двигунів під час їх запуску. Основною метою цього дослідження було визначення чинників, що сприяють зниженню пускових струмів, і вивчення перехідних станів, які виникають, коли ці двигуни знаходяться під напругою. У роботі зазначається, що асинхронні двигуни, які мають широке застосування в промисловості завдяки їх міцності і надійності, часто стикаються з проблемами, пов'язаними з надмірними пусковими струмами, які можуть перевантажити як сам двигун, так і мережу живлення. Дослідження використовує як теоретичні, так і експериментальні підходи для аналізу цих перехідних станів. Диференціальні рівняння використовуються для моделювання явищ запуску, зосереджуючись на таких параметрах, як час запуску двигуна та зміна величини ковзання. Експериментальне дослідження проводиться на асинхронному двигуні потужністю 4 кВт і при цьому вимірювались значення пускового струму для підтвердження теоретичних моделей. Результати досліджень підкреслили значний вплив пускових струмів на продуктивність двигуна та стабільність роботи мережі. Для пом'якшення цих впливів запропоновано різноманітні сучасні рішення, такі як пристрої плавного пуску та частотно-регульовані приводи. Прийняті рішення оцінювались на основі їх здатності зменшувати проблеми з якістю електричної енергії та покращенні процесу запуску двигуна. У дослідженні зроблено висновок, що точне моделювання та розширені методи керування є важливими для оптимізації процесів пуску та забезпеченні ефективної роботи низьковольтних асинхронних двигунів у промисловому застосуванні.

У [27] здійснено розробку та аналіз системи керування безщітковими двигунами постійного струму, які використовуються в судових механізмах. Основною метою дослідження було створення імітаційної моделі та схеми керування позиційним електроприводом для дослідження його динаміки. Увага дослідників була зосереджена на перехідних

процесах в електроприводі та на підвищенні якості керування безщітковими двигунами з постійними магнітами. Використовуючи сучасну теорію електроприводу та теорію автоматичного керування, дослідники використовували комп'ютерне моделювання в Matlab/Simulink для досягнення поставлених цілей. Основним результатом дослідження була розробка імітаційної моделі, яка дозволила здійснити тестування алгоритмів керування та оптимізацію параметрів системи керування. Крім того, був створений лабораторний стенд для полегшення досліджень і випробувань рішень, спрямованих на зменшення пульсацій крутного моменту приводу. Дослідження показало, що система управління є ефективною, демонструючи якісні показники під час моделювання. Перехідні процеси показали, що швидкість двигуна змінюється відповідно до трапецієподібного графіка, що оптимізує перевантажувальну здатність двигуна та мінімізує перерегулювання. Однак дослідження також виявило проблеми з пульсаціями крутного моменту, спричиненими пульсаціями струму під час перемикання фаз, що може негативно вплинути на регулювання швидкості, особливо на низьких частотах обертання. Дослідники дійшли висновку, що подальша оптимізація системи керування може підвищити продуктивність безщіткових двигунів у різних сферах застосування. Результати дослідження підкреслюють важливість передових методів керування для підвищення ефективності та надійності роботи електроприводів.

У [28] дослідники зосередились на розробці методів і математичних моделей для розрахунку перехідних і стаціонарних режимів асинхронного електроприводу в умовах періодичного навантаження. Метою дослідження було створення точних математичних моделей, які можуть імітувати динамічну поведінку асинхронних двигунів з урахуванням таких факторів, як насичення магнітного осердя та струмове зміщення в стрижнях ротора. Складена модель дозволила визначити шляхи для оптимізації критеріїв вибору двигунів та способів керування для досягнення максимальної

ефективності за різних умов навантаження. Обрана в роботі методологія надала опис електромагнітних процесів за допомогою системи нелінійних диференціальних рівнянь з використанням ортогональних осей, що дозволяє проводити ефективні обчислення. У дослідженні було розроблено алгоритми, які враховують характеристики намагніченості та зміщення струму шляхом моделювання обмотки ротора як багатошарової структури. Результати дослідження показують, що запропоновані методи ефективно розраховують перехідні та стаціонарні режими асинхронних приводів, забезпечуючи візуалізацію залежностей ключових параметрів у часі, таких як струми та електромагнітний момент. Модель дозволяє також ідентифікувати умови виникнення резонансу. Розроблені математичні моделі та алгоритми мають важливе значення для проектування та аналізу електроприводів зі змінним навантаженням. Практично завдяки моделі була отримана можливість оптимізувати параметри двигуна щодо перевантажувальної здатності, потужності та нагрівання, забезпечуючи надійну та ефективну його роботу у складі електроприводу.

3 РОЗРАХУНОК НОМІНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Для характеризування роботи асинхронного двигуна необхідно визначити певні його параметри, які поєднуються в схемі заміщення (рис. 3.1):

- активні та індуктивні опори обмоток статора (r_1, x_1),
- активні та індуктивні опори обмоток ротора (r_2, x_2),
- опір взаємної індукції (x_{12}),
- опір втрат у сталі статора (r_{12}).

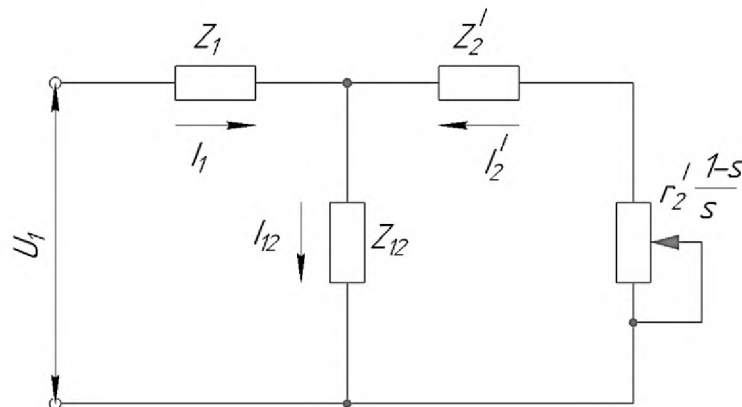


Рисунок 3.1 – Схема заміщення асинхронної машини

Середня ширина статорної котушки [29]:

$$b_{\text{сеп.}} = \frac{\pi \cdot \beta_1 \cdot (D + h_{n1})}{2p}, \quad (3.1)$$

де β_1 – відносне укорочення кроку обмотки статора, $\beta_1 = 1$,

D – внутрішній діаметр статора, $D = 82 \cdot 10^{-3}$ м,

h_{n1} – розміри паза у штампі, $h_{n1} = 14 \cdot 10^{-3}$ м

p – число полюсів двигуна, $p = 1$.

$$b_{сер.} = \frac{\pi \cdot 1 \cdot (82 \cdot 10^{-3} + 14 \cdot 10^{-3})}{2} = 150,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Довжина лобової частини [29]:

$$l_{л.} = k_{л.} \cdot b_{сер.} + 2 \cdot B, \quad (3.2)$$

де $k_{л.}$ – коефіцієнт видовження для лобової частини, $k_{л.} = 1,2$,

B – довжина вильоту прямолінійної частини катушок з паза,
 $B = 10 \cdot 10^{-3}$ м.

$$l_{л.} = 1,2 \cdot 150,7 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 200,84 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Виліт лобових частин обмоток [29]:

$$l_{вил.} = k_{вил.} \cdot b_{сер.} + B, \quad (3.3)$$

де $k_{вил.}$ – коефіцієнт вильоту, $k_{вил.} = 0,26$.

$$l_{вил.} = 0,26 \cdot 150,7 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3} = 49,18 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Середня довжина витка обмотки [29]:

$$l_{вил.} = k_{вил.} \cdot b_{сер.} + B, \quad (3.4)$$

де $l_{н.}$ – довжина пазової частини (дорівнює конструктивній довжині осердя машини), $l_{н.} = l_{\delta} = 79 \cdot 10^{-3}$ м.

$$l_{сер.} = 2 \cdot (l_{н.} + l_{л.}) = 2 \cdot (79 \cdot 10^{-3} + 200,84 \cdot 10^{-3}) = 558,92 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Загальна довжина ефективних провідників фази обмотки [29]:

$$L = l_{\text{сер.}} \cdot w_1, \quad (3.5)$$

де w_1 – число витків у фазі обмотки статора, $w_1 = 392$.

$$L = 558,92 \cdot 10^{-3} \cdot 392 = 219,11 \text{ м.}$$

Активний опір статорної обмотки [29]:

$$r_1 = \frac{L}{q_{\text{эф.}} \cdot a} \cdot k_r \cdot \rho_g = \frac{219,11}{0,393 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \cdot 1 \cdot 23,9 \cdot 10^{-9} = 13,33 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

де $q_{\text{эф.}}$ – перетин ефективного провідника, $q_{\text{эф.}} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$,

k_r – коефіцієнт збільшення активного опору, $k_r = 1$.

ρ_g – питомий опір матеріалу статорної обмотки $\rho_g = 24 \cdot 10^{-9}$ (Ом·мм²/м).

$$r_1 = \frac{219,11}{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \cdot 1 \cdot 24 \cdot 10^{-9} = 13,33 \text{ Ом.}$$

Опір стрижнів короткозамкненого ротора [29]:

$$r_c = \frac{l_c \cdot \rho_c \cdot k_r}{q_c}, \quad (3.7)$$

де l_c – довжина стрижня короткозамкненого ротора: $l_c = 79 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,

ρ_c – питомий опір алюмінієвих стрижнів короткозамкненого ротора, $\rho_c = 46 \cdot 10^{-9}$ (Ом·мм²/м).

q_c – перетин стрижня короткозамкненого ротора, $q_c = 67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

$$r_c = \frac{79 \cdot 10^{-3} \cdot 46 \cdot 10^{-9} \cdot 1}{67 \cdot 10^{-6}} = 54 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Активний опір короткозамкненого ротора [29]:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{\text{KK}}}{\Delta^2}, \quad (3.8)$$

де r_{KK} – опір короткозамикаючого кільця, $r_{\text{KK}} = 2,3 \cdot 10^{-6}$ Ом,

Δ – геометричний параметр, що розраховується за формулою [29]:

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \quad (3.9)$$

де Z_2 – число пазів ротора, $Z_2 = 18$,

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{\text{KK}}}{\left(2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}\right)^2} = 54 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-6}}{\left(2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{18}\right)^2} = 92,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Активний опір короткозамкненого ротора, що приведено до статорної обмотки [29]:

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{\text{обл}})^2}{Z_2}, \quad (3.9)$$

де m – число фаз, $m = 3$,

$k_{\text{обл}}$ – обмотковий коефіцієнт, $k_{\text{обл}} = 0,93$.

$$r_2' = 92,6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (392 \cdot 0,93)^2}{18} = 8,1 \text{ Ом.}$$

Відносне значення опору ротора [29]:

$$R_2 = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \quad (3.10)$$

де I_{1H} – номінальний струм статора двигуна, $I_{1H} = 2,4$ А,

$U_{1H\phi}$ – номінальна фазна напруга живлення двигуна, $U_{1H\phi} = 380$ В,

$$R_2 = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 8,1 \cdot \frac{2,4}{380} = 0,0512 \text{ в.о.}$$

Індуктивний опір статорної обмотки статора [29]:

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta \cdot (\lambda_n + \lambda_\pi + \lambda_\partial)}{p \cdot q}, \quad (3.11)$$

де f – частота напруги живлення, $f = 50$ Гц,

λ_n – коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання ротора,
 $\lambda_n = 1,1$.

λ_π – коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання, $\lambda_\pi = 2$,

λ_∂ – коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання для обмоток статора, $\lambda_\partial = 2,3$.

q – число пазів на полюс і фазу статора, $q = 4$.

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{392}{100} \right)^2 \cdot \frac{79 \cdot 10^{-3} \cdot (1,1 + 2 + 2,3)}{1 \cdot 4} = 13 \text{ Ом.}$$

Відносне значення опору статора [29]:

$$x_1' = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 13 \cdot \frac{2,4}{380} = 0,082 \text{ в.о.}$$

Індуктивний опір обмотки короткозамкненого ротора [29]:

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 \cdot f \cdot l_\delta \cdot (\lambda_n + \lambda_\pi + \lambda_\partial) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 79 \cdot 10^{-3} \cdot (1,1 + 2 + 2,3) \cdot 10^{-6} = 16,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Індуктивний опір фази ротора, приведений до статорної обмотки [29]:

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{\text{об1}})^2}{Z_2} = 16,8 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (392 \cdot 0,93)^2}{18} = 14,9 \text{ Ом.} \quad (3.13)$$

Відносне значення індуктивного опору ротора [29]:

$$X_2 = x_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 14,9 \cdot \frac{2,4}{380} = 0,0941 \text{ в.о.}$$

Для розрахованих значень будемо характеристики асинхронного двигуна – рис. 3.3 – 3.7.

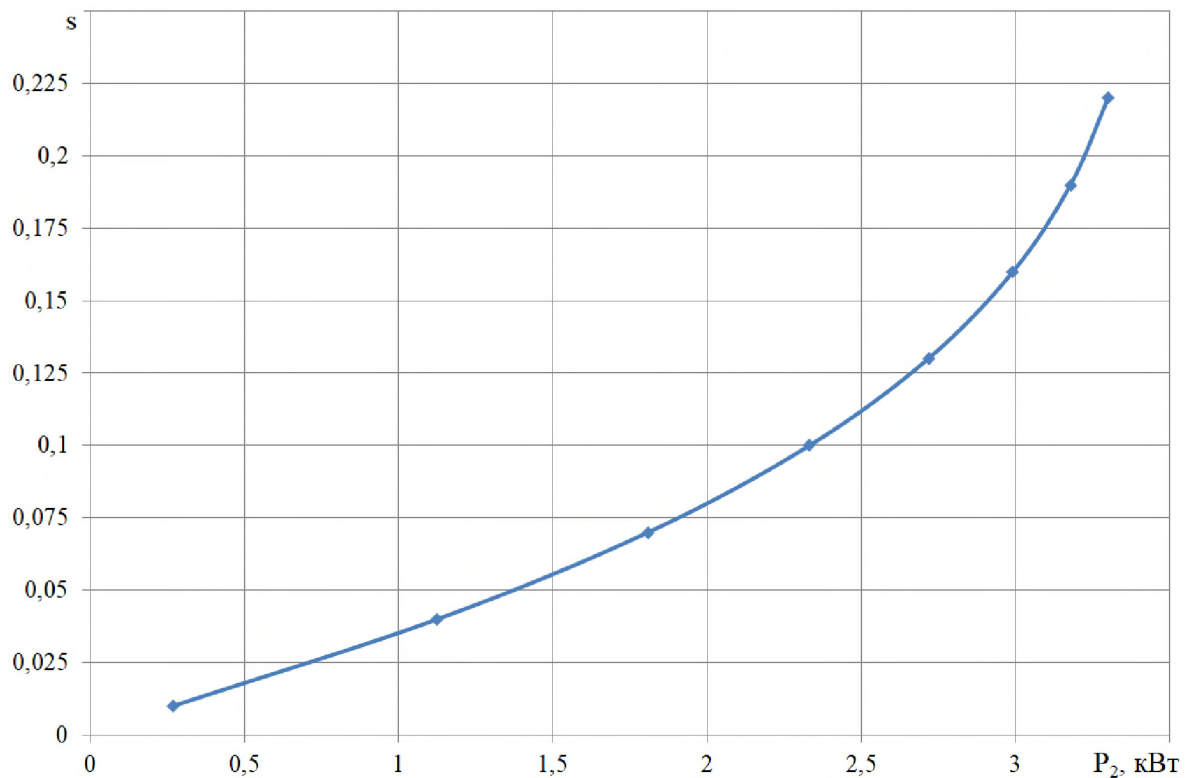


Рисунок 3.3 – Зміна величини ковзання від прикладеної потужності на валу двигуна

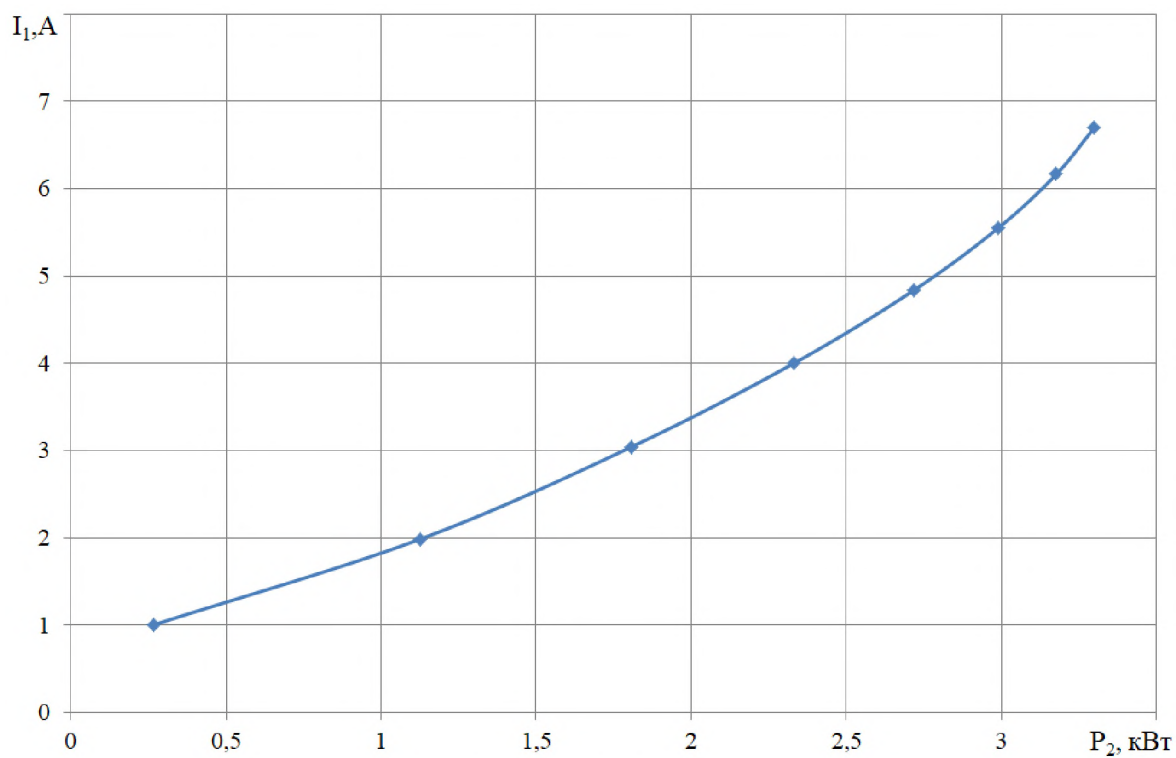


Рисунок 3.4 – Зміна статорного струму від прикладеної потужності на валу двигуна

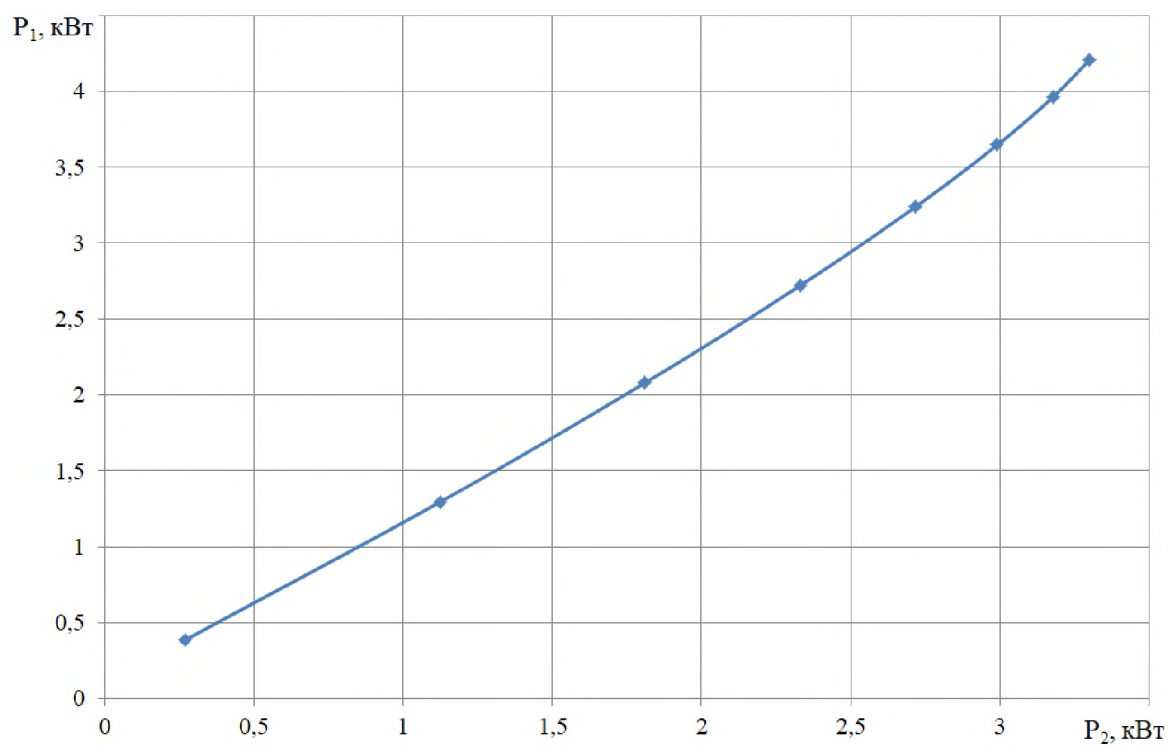


Рисунок 3.5 – Зміна споживання енергії від прикладеної потужності на валу двигуна

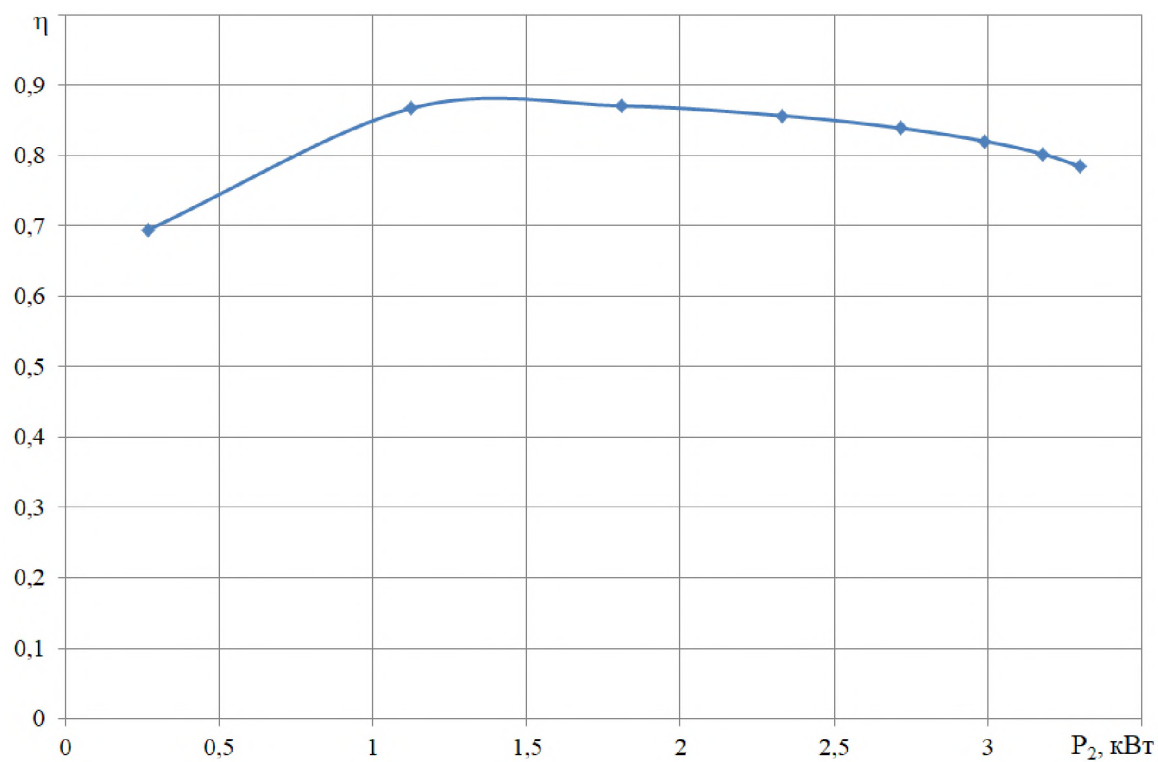


Рисунок 3.6 – Зміна коефіцієнта корисної дії від прикладеної потужності на валу двигуна

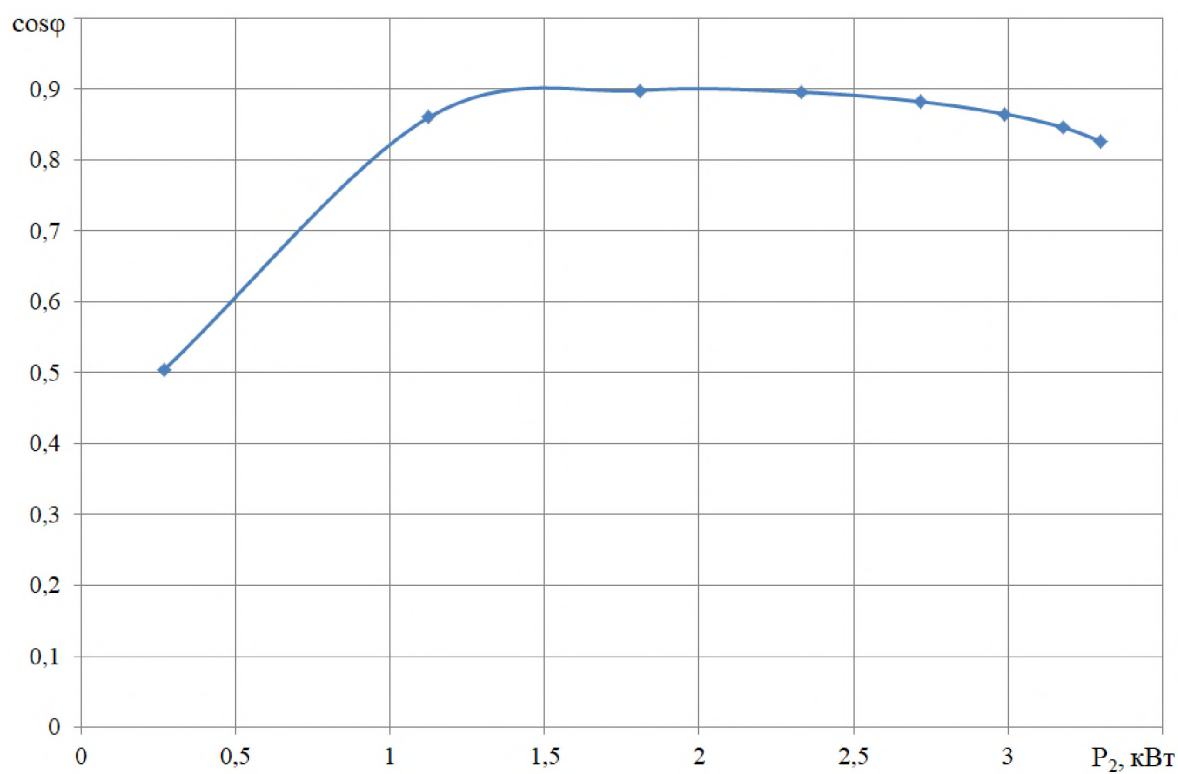


Рисунок 3.7 – Зміна коефіцієнта потужності від прикладеної потужності на валу двигуна

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для вивчення електроприводів з асинхронними двигунами та керування ними за допомогою силових електроніки необхідно передбачити комплексний підхід до моделювання та симуляції. Ця методологія повинна поєднувати теоретичні основи з передовими інструментами моделювання та програмним забезпеченням для точного відображення рухової поведінки та ефектів різних стратегій контролю. Такий підхід забезпечує стійкість і надійність результатів, надаючи цінну інформацію про принципи оптимізації систем електроприводу.

При плануванні досліджень необхідно здійснити розробку або використати існуючі математичні моделі, які здатні точно відображати динаміку асинхронних двигунів і силових електронних перетворювачів. Ці моделі базуються на фундаментальних принципах електромагнетизму, теорії ланцюгів і механіки. Диференціальні рівняння, що керують електричною та механічною поведінкою двигуна, виводяться та згодом перетворюються у відповідні системи відліку для полегшення аналізу та керування [30].

Після встановлення та визначення відповідних математичних моделей наступним етапом повинно бути передбачено їх моделювання за допомогою передових засобів моделювання та програмного забезпечення. Одним з таких інструментів є Matlab/Simulink, що має потужні можливості моделювання, симуляції та аналізу динамічних систем. Графічний інтерфейс Simulink дозволяє будувати блок-схеми, які представляють математичні рівняння, полегшуючи візуалізацію поведінки системи та здійснюючи моделювання при різних умовах. Matlab здатне забезпечити надійне середовище для створення сценаріїв і виконання складних математичних обчислень, уможливорюючи реалізацію алгоритмів керування та аналіз результатів моделювання [30].

Розробка та впровадження різних стратегій керування асинхронними двигунами, що включають методи скалярного та векторного керування, реалізуються в середовищі моделювання для оцінки їх ефективності в різних робочих умовах. Ефективність кожної стратегії управління оцінюється на основі таких критеріїв, як регулювання частоти обертання, реакція на навантажувальний крутний момент, ефективність і стійкість до перешкод. Результати моделювання можна проаналізувати, щоб визначити оптимальний підхід до керування для конкретних застосувань [31].

Розробка моделі для електроприводів з асинхронними двигунами, керованими силовою електронікою, передбачає систематичний і детальний покроковий процес. Визначене гарантує, що отримана модель точно відображає складну взаємодію між двигуном і силовими електронними компонентами, сприяючи точному аналізу та оптимізації.

Першим кроком у процесі розробки моделі є формулювання математичного представлення асинхронного двигуна. Це починається з визначення електричних і механічних характеристик двигуна. Контури статора і ротора двигуна представлені за допомогою диференціальних рівнянь, заснованих на законах індукції та законі Ома. Ці рівняння описують зв'язки між напругами, струмами та потокозчепленнями в двигуні. Зокрема, рівняння напруги статора та ротора виводяться як функції їхніх відповідних опорів, індуктивності та взаємної індуктивності. Ці рівняння виражені в стаціонарній системі відліку і можуть бути перетворені в синхронну систему відліку за допомогою перетворень для спрощення реалізації стратегії керування. Ці рівняння були представлені у п. 2.2.

Модель для імітації поведінки електроприводу наведено на рис. 4.1 [32].

стратегії керування. Результати дають змогу зрозуміти сильні та слабкі сторони кожного підходу, керуючи вибором найбільш підходящого методу керування для конкретних застосувань [31].

Результати моделювання складеної моделі представлено на рис. 4.2 – 4.6.

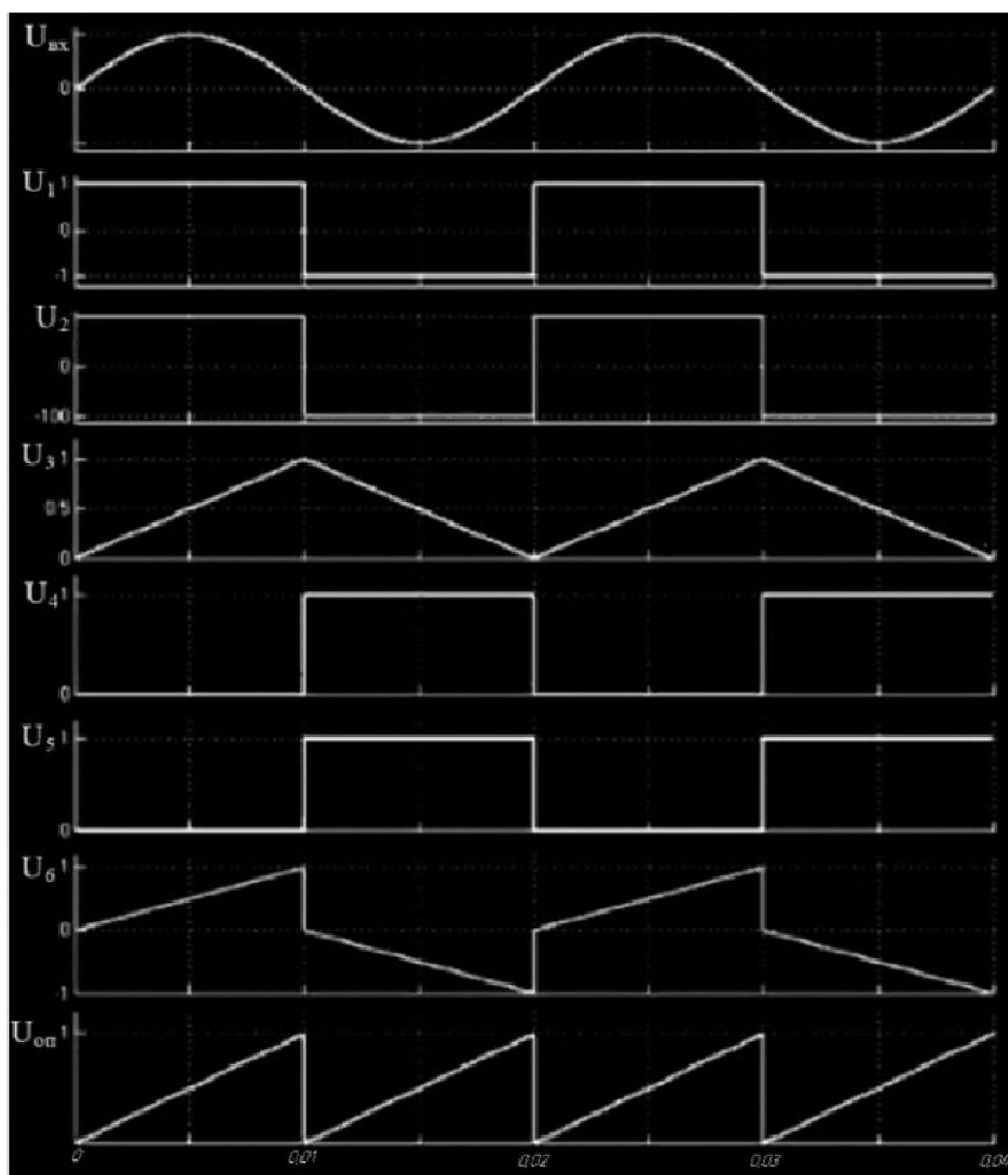


Рисунок 4.2 – Напруга на виходах генератора опорної напруги

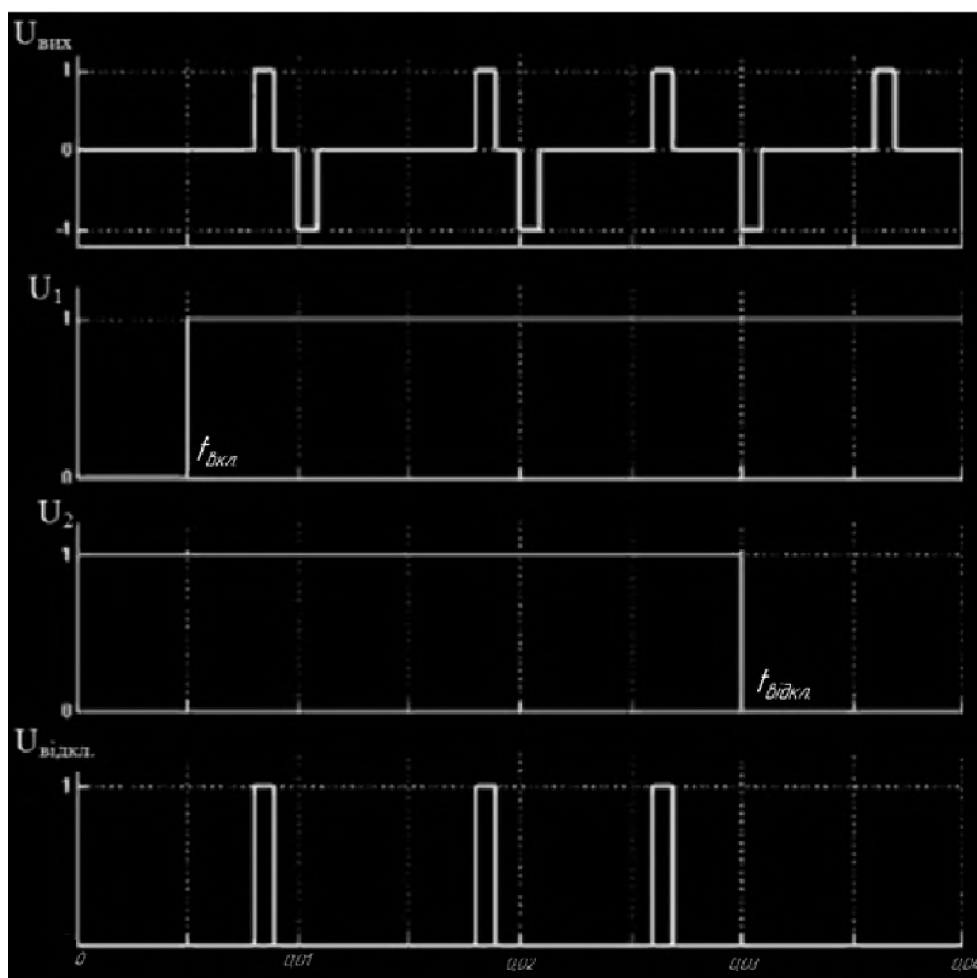


Рисунок 4.3 – Напруга на виходах формувача для формування імпульсів відкриття тиристорів

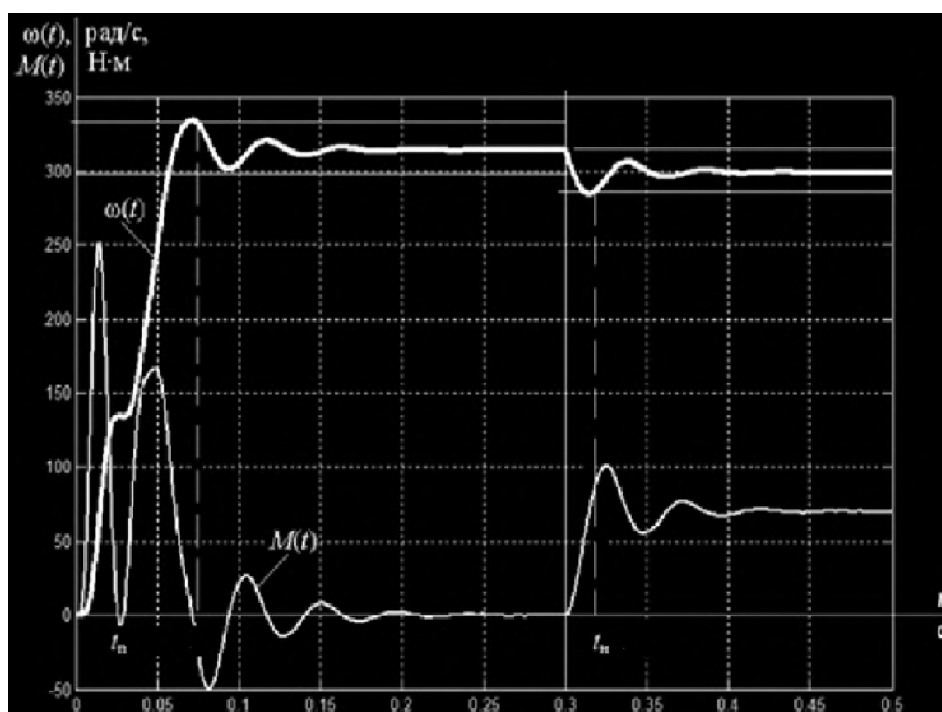


Рисунок 4.4 – Зміна характеристик пуску електроприводу (колова частота обертання і крутний момент) при частотному керуванні $U/f = \text{const}$ та частковій компенсації (на рівні 0,1)

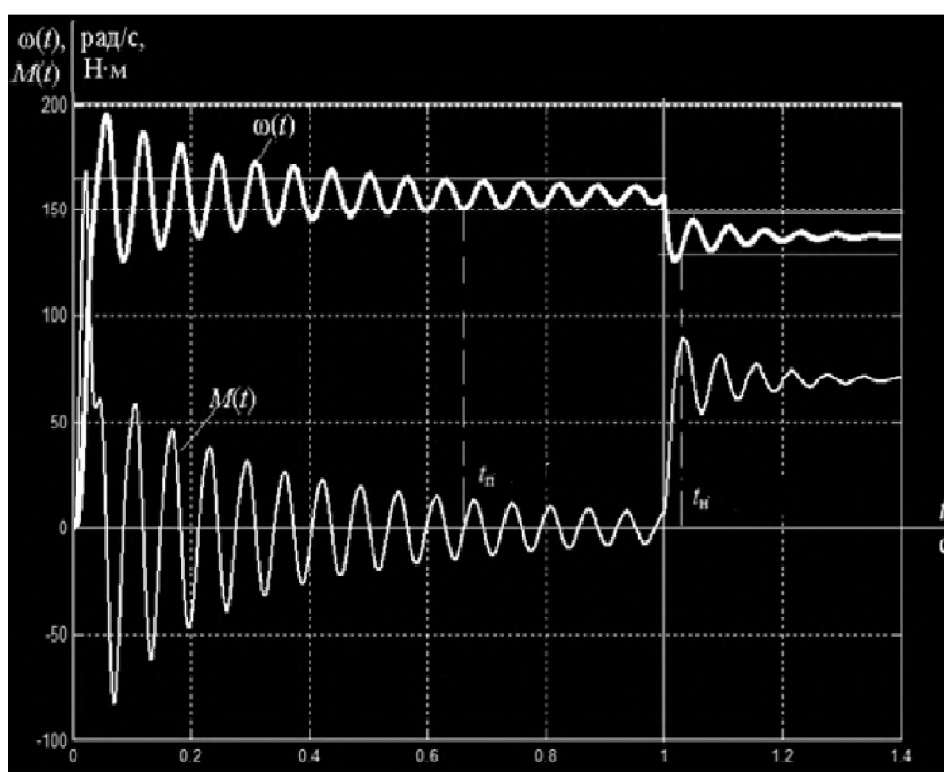


Рисунок 4.5 – Зміна характеристик пуску електроприводу (колова частота обертання і крутний момент) при частотному керуванні $U/f = \text{const}$, частоті живлення 25 Гц та частковій компенсації (на рівні 0,25)

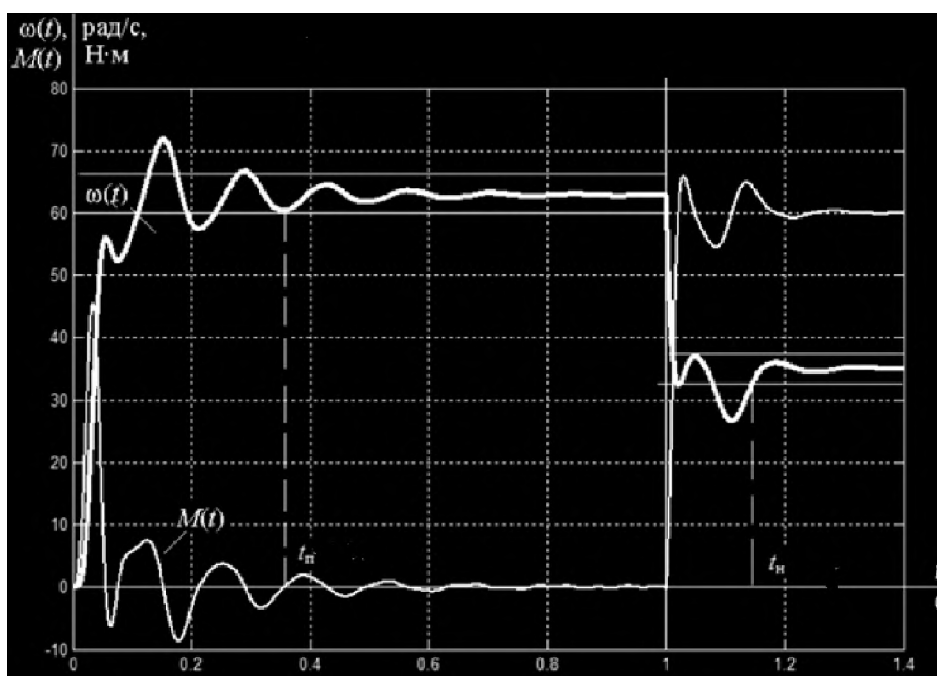


Рисунок 4.6 – Зміна характеристик пуску електроприводу (колова частота обертання і крутний момент) при частотному керуванні $U/f = \text{const}$, частоті живлення 10 Гц та частковій компенсації (на рівні 0,1)

Моделювання електроприводів з асинхронними двигунами та силовим електронним керуванням передбачає ретельний процес визначення параметрів і початкових умов, а також встановлення повного набору сценаріїв моделювання та випадків. Цей підхід забезпечує ретельну оцінку продуктивності системи в різних умовах експлуатації, надаючи цінну інформацію про її ефективність, міцність і надійність. Використання передових засобів моделювання, таких як Matlab/Simulink, забезпечує точний і ефективний аналіз, сприяючи оптимізації системи електроприводу для промислового застосування.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було розроблено комплексну методику моделювання та аналізу роботи асинхронних електроприводів із застосуванням силових електронних пристроїв. Дана методика дозволяє враховувати основні динамічні та перехідні процеси, що відбуваються в електроприводах, забезпечуючи високу точність і надійність отриманих результатів.

Використання сучасних інструментів моделювання, таких як Matlab/Simulink, значно підвищує ефективність аналізу та дозволяє оптимізувати параметри роботи електроприводів для різних умов експлуатації.

Дослідження показали, що застосування асинхронних двигунів у поєднанні з силовою електронікою забезпечує підвищення енергоефективності та поліпшення динамічних характеристик електроприводів. Розроблені математичні моделі дозволяють точно описувати поведінку двигуна при змінних навантаженнях, що є критично важливим для промислових застосувань, де стабільність та ефективність роботи обладнання мають першорядне значення.

Впровадження передових методів керування, такого як пряме керування крутним моментом, дозволило досягти високої точності та швидкості реакції системи на зміни робочих умов. Це, у свою чергу, сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню продуктивності, що є важливими факторами для сучасних промислових підприємств.

Аналіз використання силової електроніки в системах керування двигунами показав, що вона забезпечує ефективне перетворення та регулювання електричної енергії, що є необхідним для досягнення оптимальної продуктивності електроприводів. Сучасні напівпровідникові пристрої, такі як інвертори та перетворювачі, демонструють високу

ефективність та надійність, що робить їх незамінними у різних галузях промисловості та енергетики. Результати дослідження підтверджують доцільність використання асинхронних двигунів із силовою електронікою для покращення ефективності та надійності роботи електроприводів. Запропонована методика моделювання та аналізу може бути застосована для подальших досліджень та розробок у галузі електроприводів, сприяючи їх сталому розвитку та інноваційному вдосконаленню.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електропривод: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко; За ред. Ю.М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». – К., 2009. – 504 с.
2. Яцун М. А. Електричні машини. Львів: Ви-во Львів. політех., 2011. – 464 с.
3. Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2015. – 403 с.
4. Квітка С.О. Силові електронні пристрої в системах керування: навчальний посібник для здобувачів вищої освіти / С.О. Квітка. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. – 180 с.
5. Моделювання електромеханічних систем: підруч. / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 410 с.
6. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.
7. Гліненко Л. К. Основи моделювання технічних систем: навч. посіб. для студ. ВНЗ / Л. К. Гліненко, О. Г. Сухоносів. - Львів : Бескид Біт, 2003. – 176 с.
8. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
9. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник / М.В. Загірняк, Т.В. Коренькова, А.П. Калінов, А.І. Гладир, В.Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
10. Bimal K. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.

11. Костинюк Л.Д., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.

12. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О.І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.

13. Видмиш А.А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

14. Овчаренко В.А., Подлесний С.В., Зінченко С.М. Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 380 с.

15. Басюк Т.М., Литвин В.В., Захарія Л.М., Кунанець Н.Е. Машинне навчання: Навчальний посібник. Львів: Видавництво «Новий Світ-2000», 2019. – 335 с.

16. MATLAB User Guide. - The MathWorks, Inc., 2014.

17. Jost Allmeling PLECS-piece-wise linear electrical circuit simulation for Simulink. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS_99. p.p. 355–360 vol. 1. doi:10.1109/PEDS.1999.794588.

18. Introduction to ANSYS Maxwell ANSYS Maxwell V16 Training Manual. Lecture 1. 2013 ANSYS, Inc. May 21, 2013 1 Release

19. PSCAD User's Guide. Commerce Drive, Winnipeg, Manitoba, Canada R3P 1A3, Inc., 2014.

20. Dingsheng Lin, Ping Zhou, David Staton, Vandana Rallabandi, Frede Blaabjerg, Mircea Popescu, Dan M. Ionel, Marius Rosu. Multiphysics Simulation by design for electrical machines. Power Electronics and Drives, 2017. Wiley-IEEE Press – 320 p.

21. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.
22. <https://vpu7.com.ua/documents/e-library/spec-tech-eroe/63.pdf>
23. Шевченко І.С., Морозов Д.І. Електромеханічні системи в асинхронному електроприводі: Навч. посібник / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 349 с.
24. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
25. Utu I., Stochitoiu M. D., Samoila L. Simulation of the electric drive with asynchronous motors of the belt conveyors in order to increase their efficiency. *Annals of the University of Petrosani, Electrical Engineering*, 2019, 21, p. 43-52.
26. Cazacu E., Ioniță V., Petrescu L. Transient state characterization of asynchronous motors in modern low-voltage electric installations. *Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty*, 2017, 18(1), p. 19-24. <https://doi.org/10.1515/SBEEF-2017-0017>.
27. Biliuk I., Savchenko O., Havrylov S., Novogreckij S., Dorosh B. Stand for research of the electric position drive of ship mechanisms and devices based on a three-phase collector-less motor. In *Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Concepts for the Development of Society's Scientific Potential»*, 2023. p. 262-269.
28. Malyar V.S., Hamola O.Y., Maday V.S. Modelling of dynamic modes of an induction electric drive at periodic load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, 3. p. 9-14. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3>.
29. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк. – Київ: Знання, 2009. – 399 с.
30. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): навч. посіб. Б.О. Пальчевський. – Львів: Світ, 2001. – 232 с.

31. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M. Law, W.D. Kelton. – New York : McGraw-Hill Publishing Co, 2000. – 3-rd edit. – 560 p.
32. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

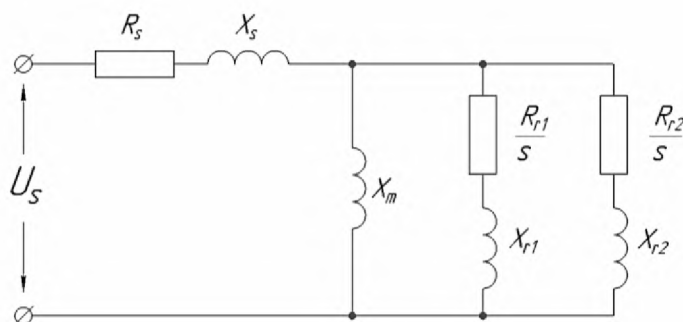
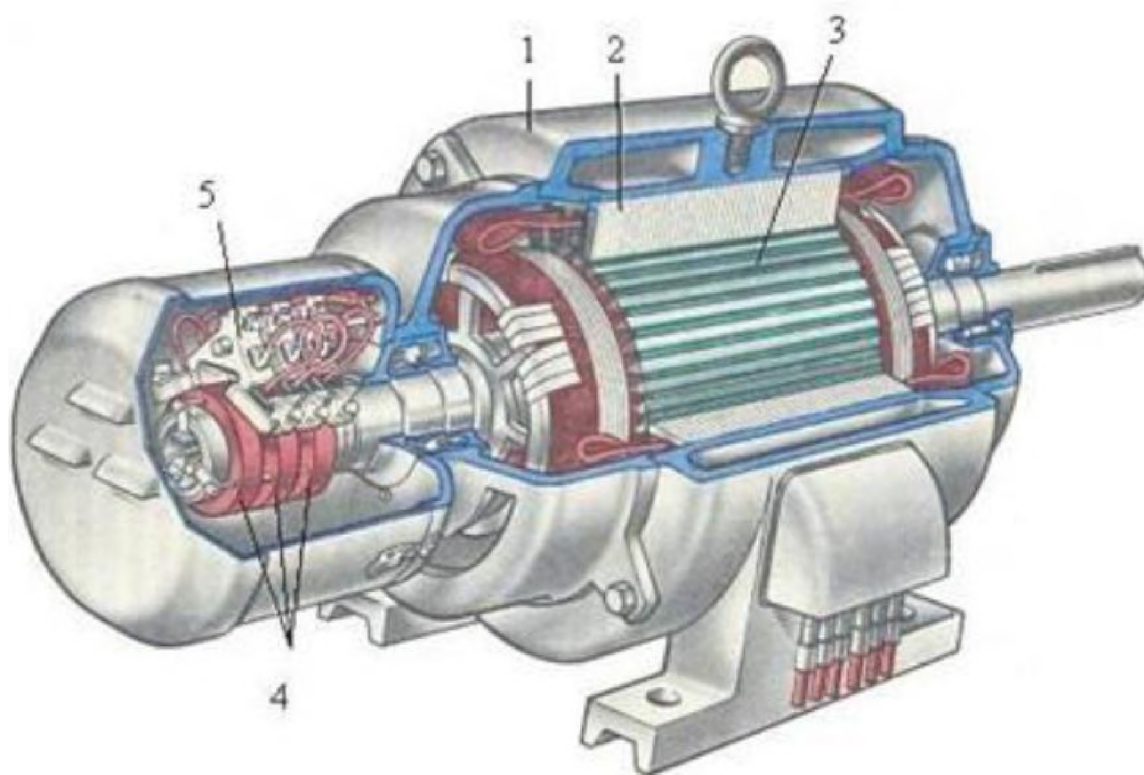
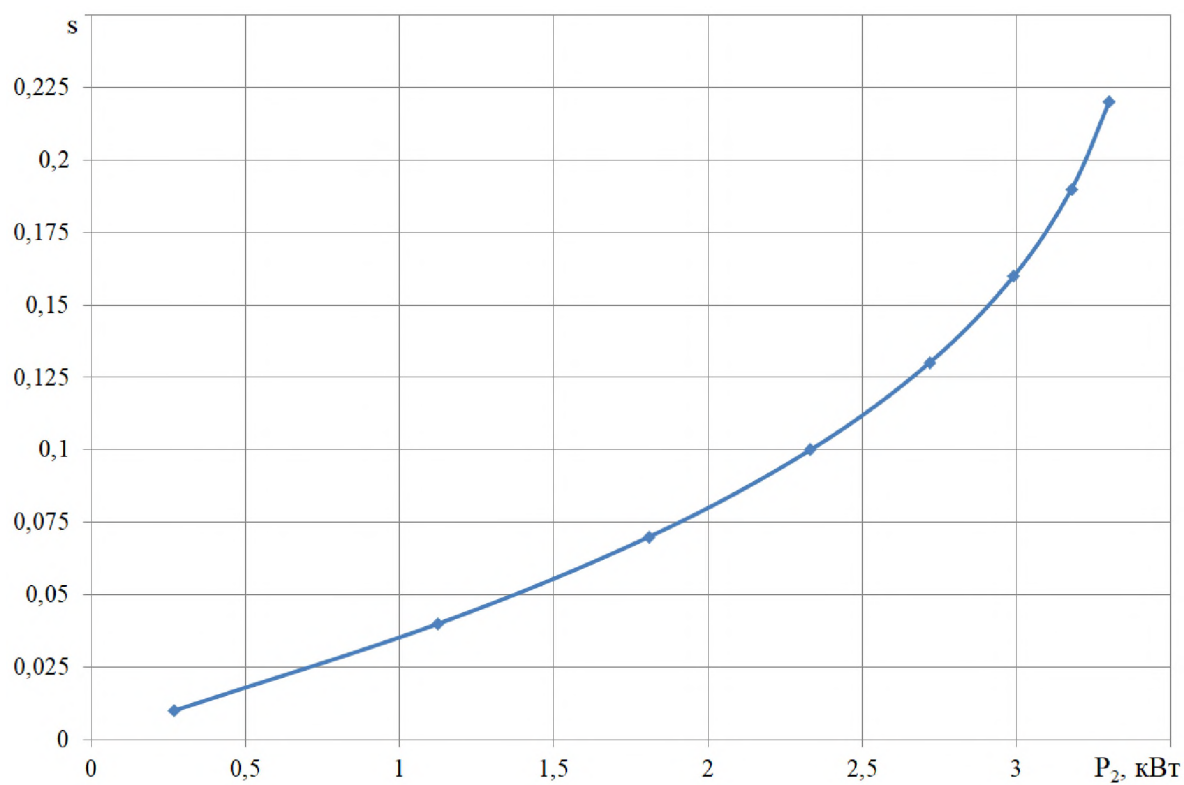


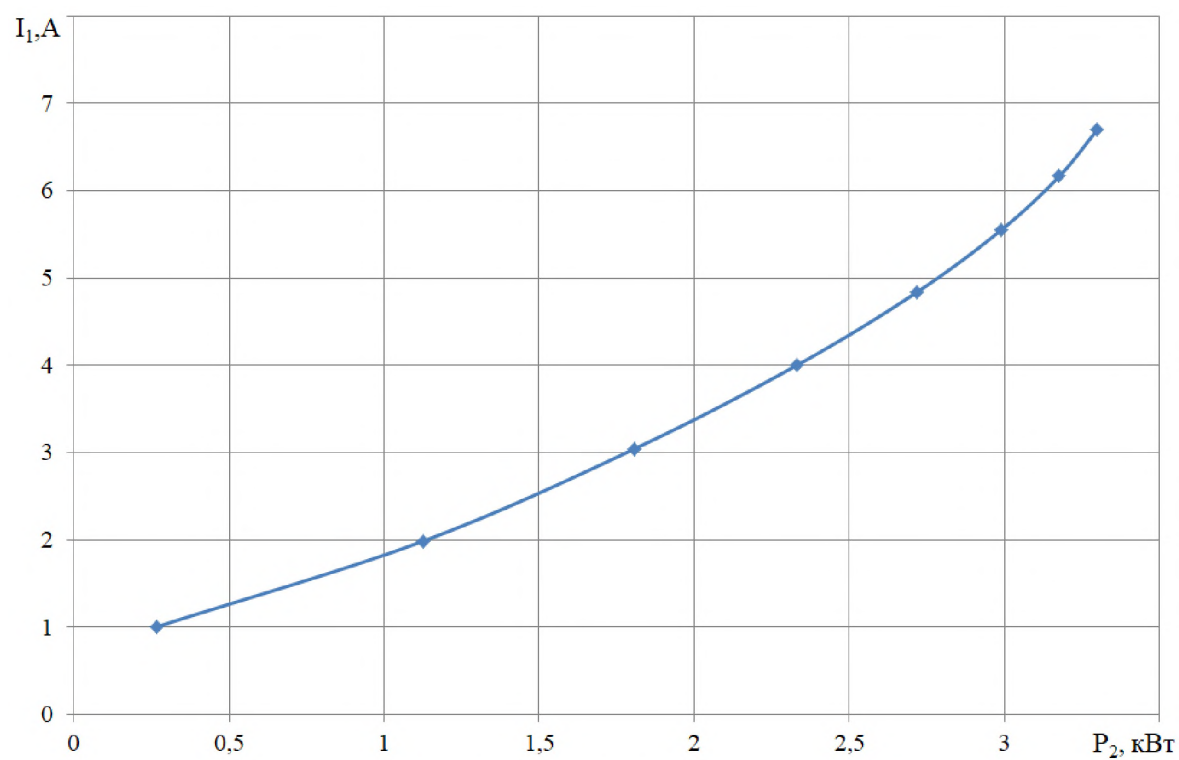
Схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором



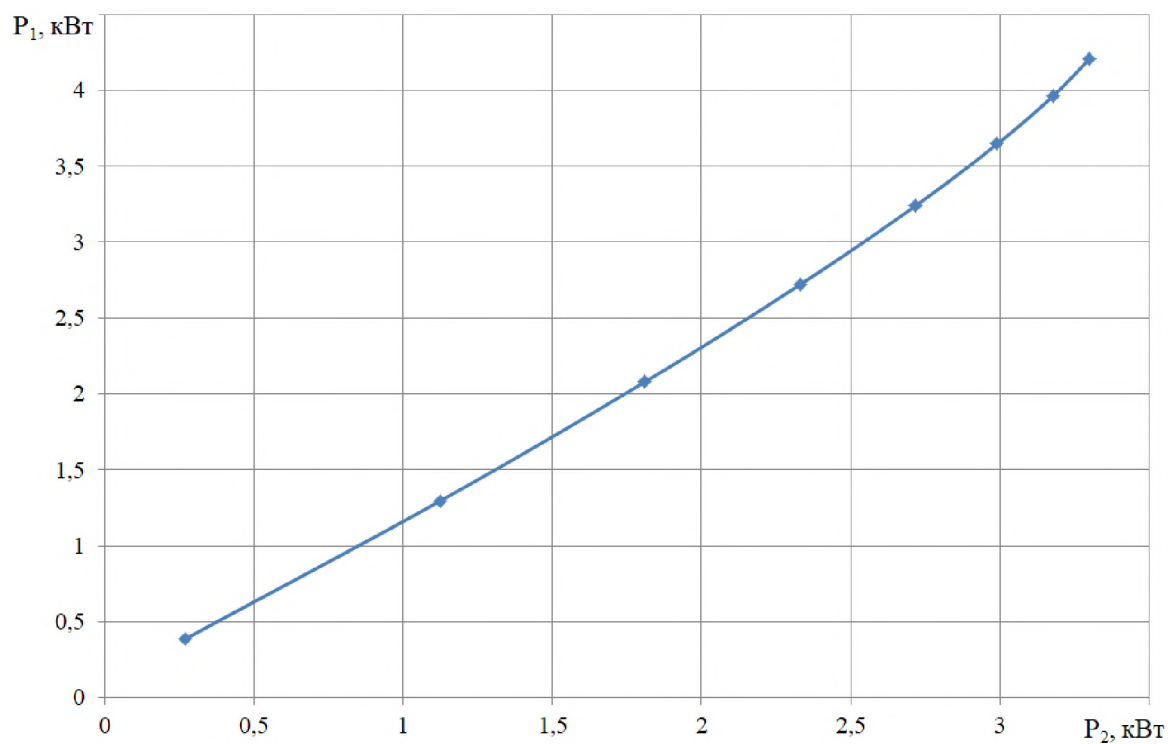
Складові частини асинхронного двигуна з фазним ротором: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактні кільця, 5 – щітковий механізм



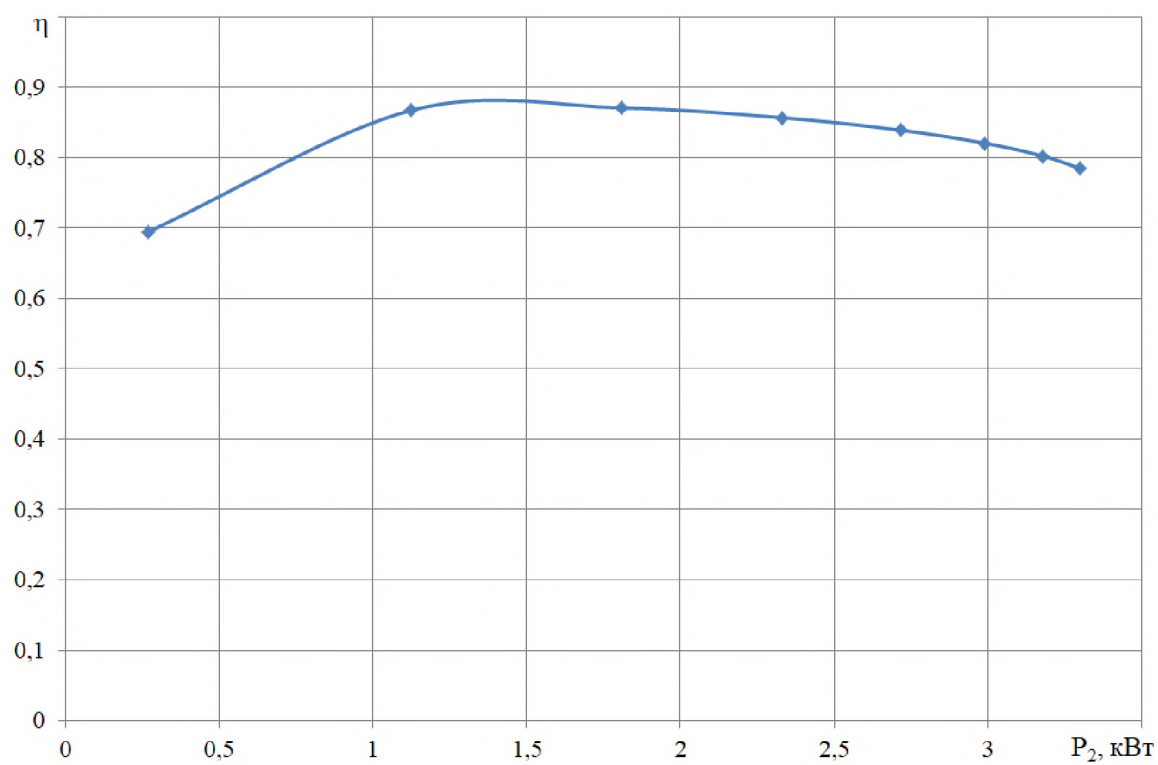
Зміна величини ковзання від прикладеної потужності на валу двигуна



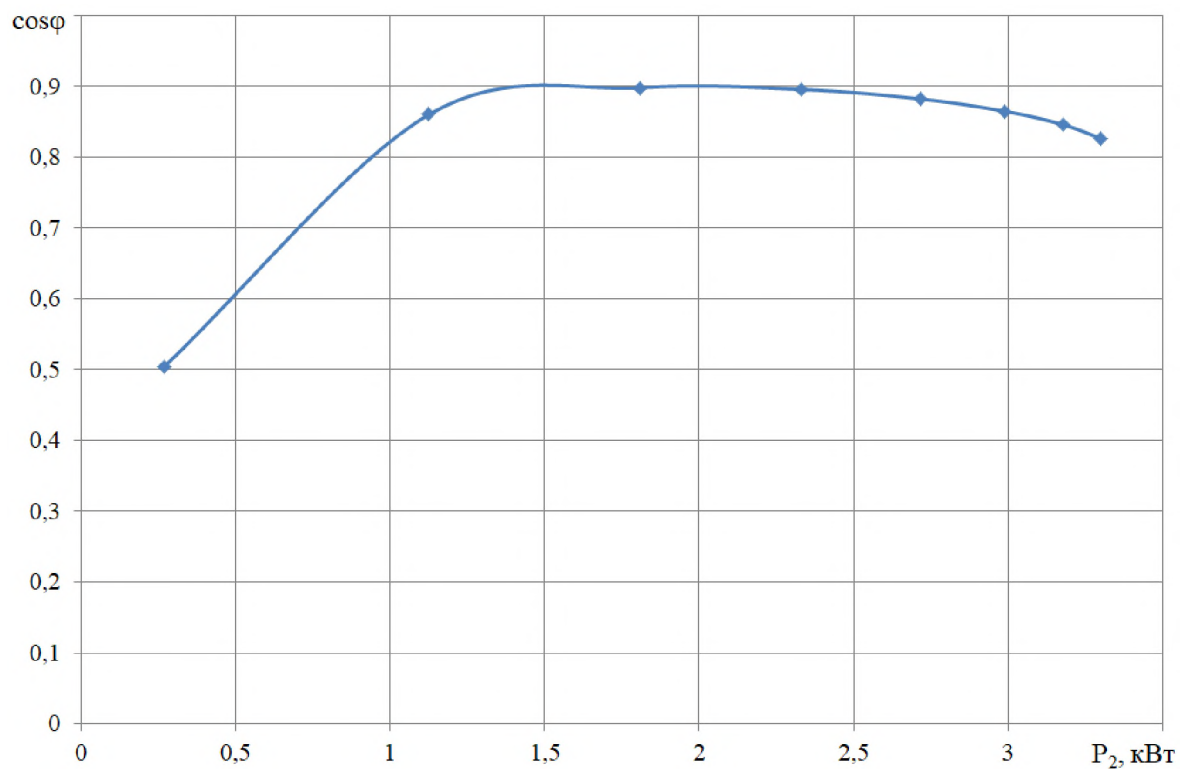
Зміна статорного струму від прикладеної потужності на валу двигуна



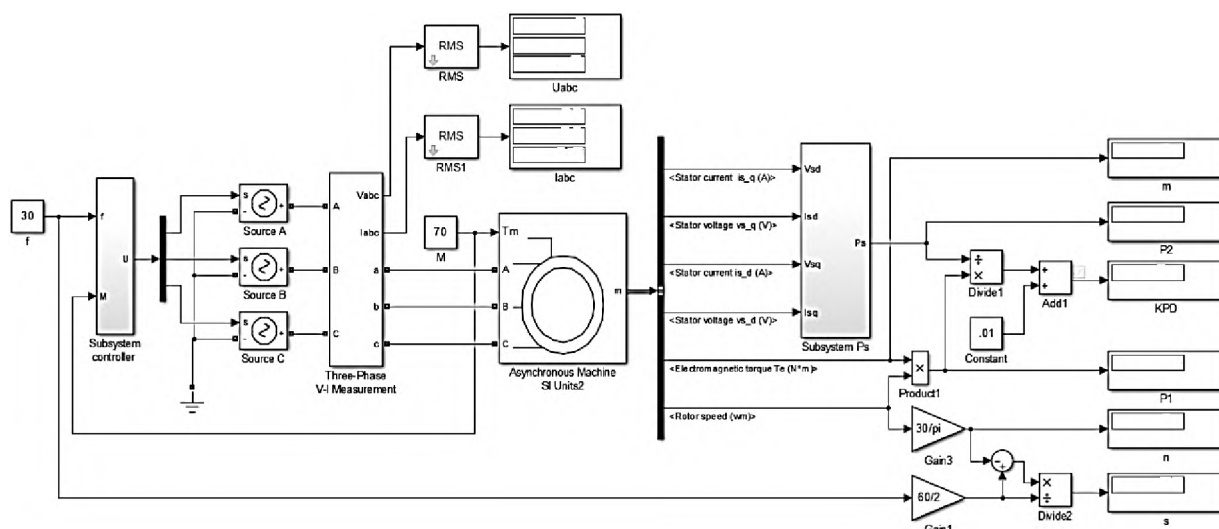
Зміна споживання енергії від прикладеної потужності на валу двигуна



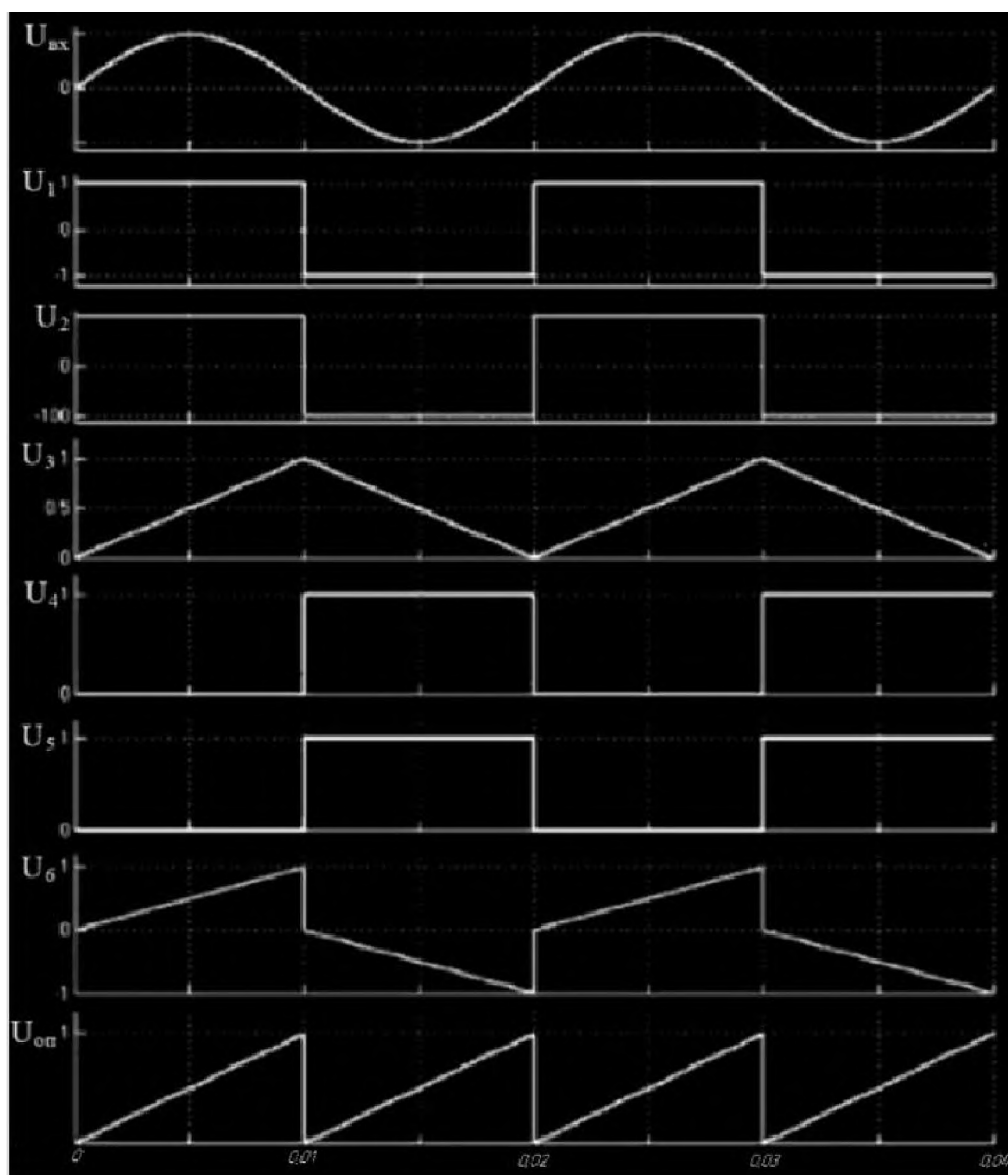
Зміна коефіцієнта корисної дії від прикладеної потужності на валу двигуна



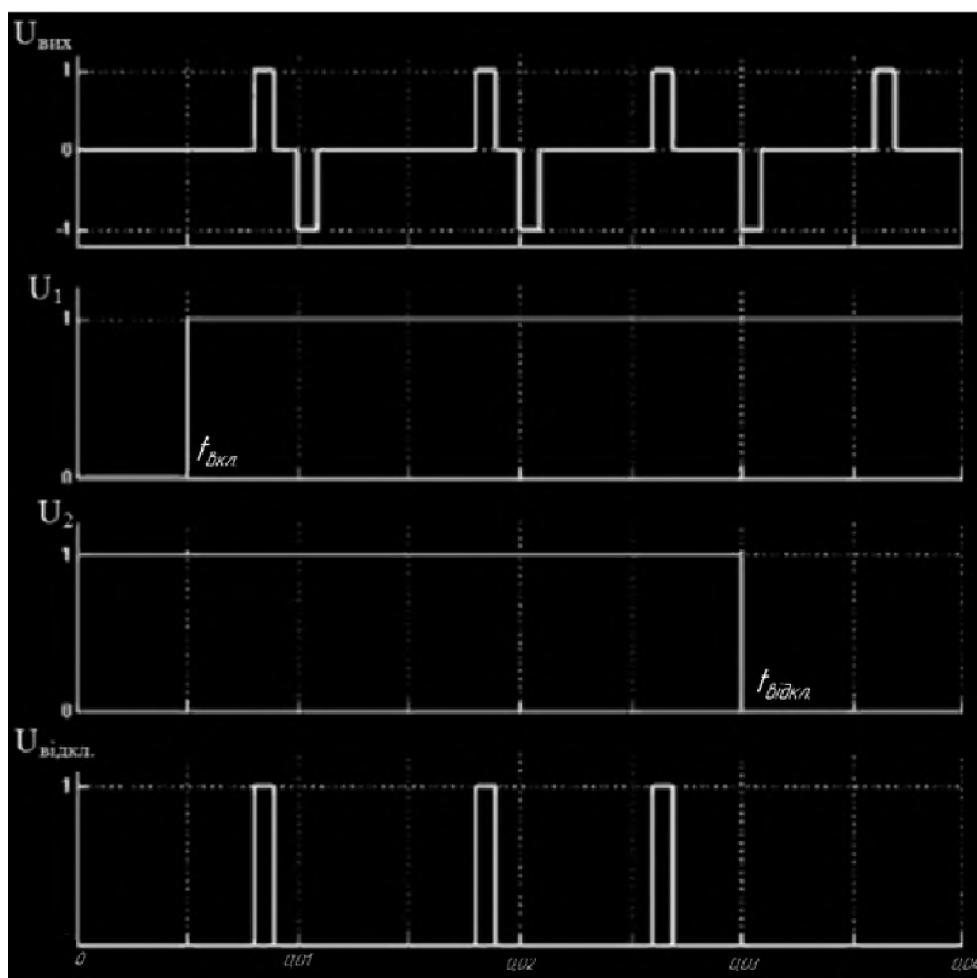
Зміна коефіцієнта потужності від прикладеної потужності на валу двигуна



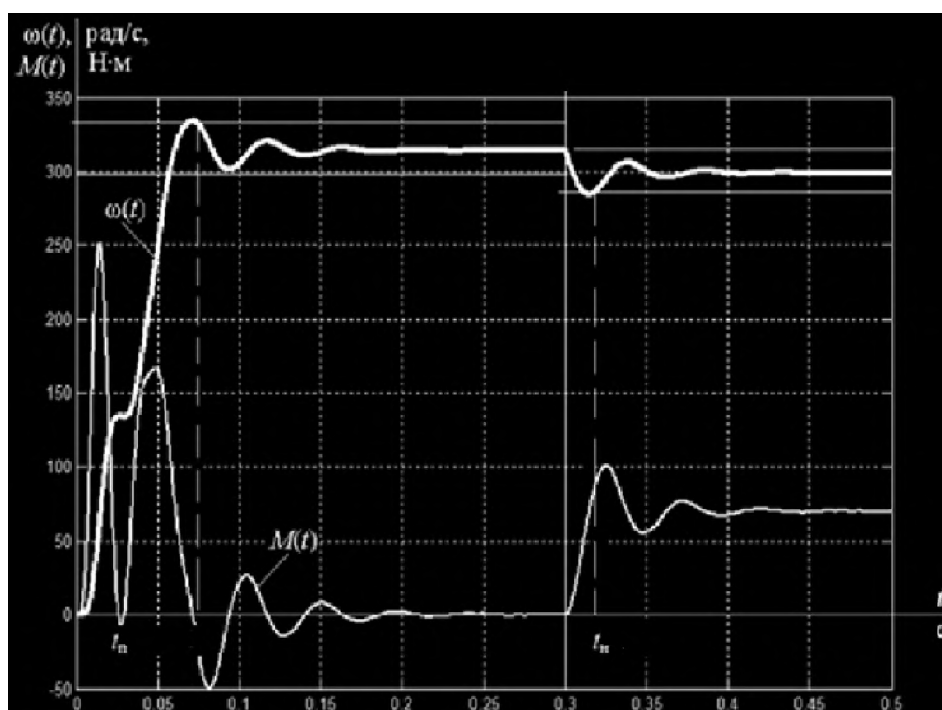
Модель імітації поведінки електроприводу



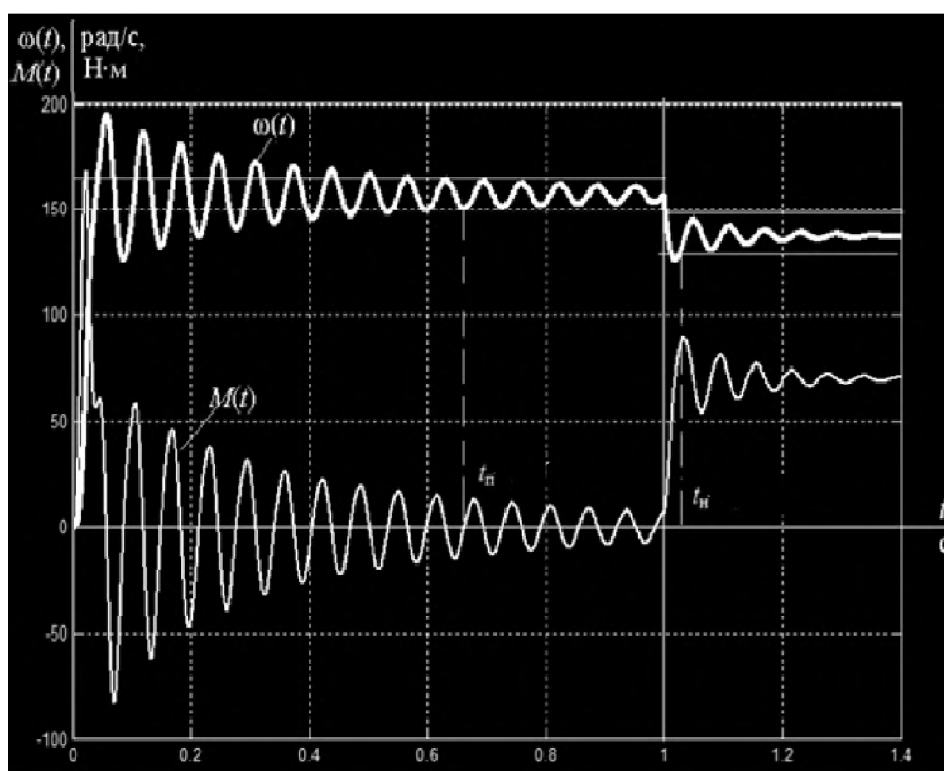
Напряга на виходах генератора опорної напруги



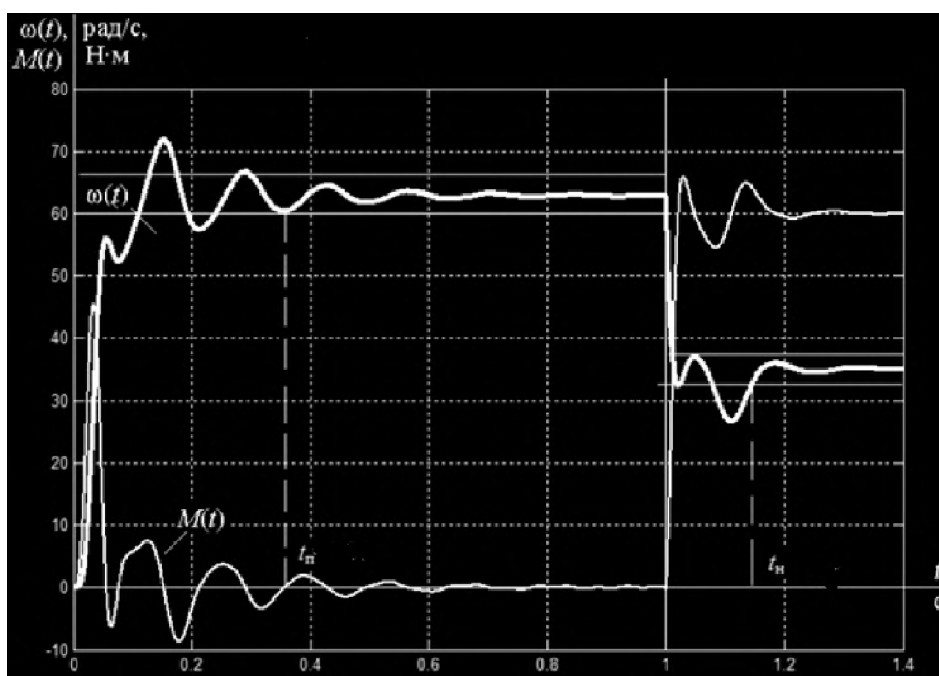
Напруга на виходах формувача для формування імпульсів відкриття тиристорів



Зміна характеристик пуску електроприводу (колова частота обертання і крутний момент) при частотному керуванні $U/f = \text{const}$ та частковій компенсації (на рівні 0,1)



Зміна характеристик пуску електроприводу (колова частота обертання і крутний момент) при частотному керуванні $U/f = \text{const}$, частоті живлення 25 Гц та частковій компенсації (на рівні 0,25)



Зміна характеристик пуску електроприводу (колова частота обертання і крутний момент) при частотному керуванні $U/f = \text{const}$, частоті живлення 10 Гц та частковій компенсації (на рівні 0,1)

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____