

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка моделі тягового асинхронного приводу для
електротранспорту

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»


Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 3 курсу
група ЕТс-22-2


Підпис

І. І. Дмитришин
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата


С. Л. Горященко
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

А. Г. Тимошук
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

В. С. Неймак
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС
2 06 2024 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

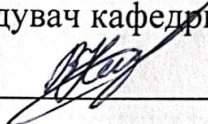
Шифр і назва

Спеціалізація Електропобутова техніка

Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2.06.2025

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дмитришин Іван Іванович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка моделі тягового асинхронного приводу для електротранспорту

керівник роботи Горященко Сергій Леонідович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи енергетичні характеристики силового обладнання

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

Вступ. 1. Огляд існуючих тягових електроприводів. 2. Модулювання асинхронного електроприводу. 3. Розрахунок електромагнітних процесів в асинхронному тяговому двигуні. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Моделі асинхронного приводу для транспорту (ДО, А1). 2. Асинхронний електродвигун (ВЗ, А1). 3. Моделювання асинхронного двигуна (ДІ2, А1). 4. Моделі асинхронного приводу для транспорту (ДІ1, А1). 5. Моделювання

асинхронного двигуна (РР, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

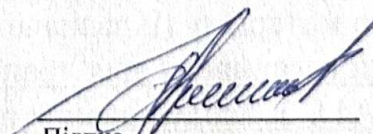
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд існуючих тягових електроприводів		
2. Модулювання асинхронного χ електропривод		
3. Розрахунок електромагнітних процесів в асинхронному тяговому двигуні		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент


Підпис

І.І. Дмитришин
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

С. Л. Горященко
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Дмитришин Іван Іванович

2. Тема магістерської роботи Розробка моделі тягового асинхронного приводу для електротранспорту

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 70

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: _____

Вступ. 1. Огляд існуючих тягових електроприводів. 2. Модулювання асинхронного електроприводу. 3. Розрахунок електромагнітних процесів в асинхронному тяговому двигуні. Висновки. Перелік джерел посилаць.

Підпис студента 

" 2 " 06 20 25 р.

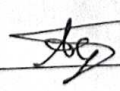
РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 3 від " 19 " 06 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК 4/6

Рекомендації ЕК —





Особливі відмітки —

Технічний секретар 

" 19 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Огляд існуючих тягових електроприводів	6
1.1 Класифікація тягових електроприводів	7
1.2 Тяговий асинхронний двигун (АС індукційний двигун)	9
1.3 Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації	10
1.4 Аналіз існуючих систем електроприводу для електротранспорту	12
1.5 Висновки до першого розділу	17
2. Модулювання асинхронного електроприводу	18
2.1 Розробка моделі АТД 18	18
2.2 Вихідне диференціальне рівняння АТД та його аналітичне розв'язання	26
2.3 Формування вектору напружень	31
2.4 Широтно-імпульсне регулювання напруги АТД – ШІР	39
2.5 Висновки до другого розділу	45
3. Розрахунок електромагнітних процесів в асинхронному тяговому двигуні	46
3.1 Номінальний режим	46
3.2 Холостий хід двигуна (вибіг)	50
3.3 Гальмівний (генераторний) режим	52
3.4 Стан запуску	53
3.5 Електромагнітні процеси в асинхронному тяговому двигуні під час живлення від інвертора струму без модуляції	56
3.6 Висновки до третього розділу	66

БРМА 25.00.00.000 ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка моделі тягового асинхронного приводу для електротранспорту	Літ.	Арк.	Акрюшід	
		Дмитришин І.						2	70
		Горященко							
		Т.Контр							
		Н. Контр.							
		Затверд.	Неймак В.С.						

ХНУ, гр. ЕТс-22-1

Висновки	67
Список використаних джерел	68
Додатки	71

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

3

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

ВСТУП

В останнє десятиліття транспортна галузь зазнає радикальних змін, пов'язаних із впровадженням електромобілів (ЕМ) як альтернативи традиційним автомобілям з двигунами внутрішнього згорання. Основними рушіями цієї трансформації стали: глобальні екологічні виклики, необхідність декарбонізації, енергетична безпека, а також зростаючий попит на економічно ефективні та високонадійні транспортні засоби.

У центрі функціонування електромобіля перебуває тяговий електропривід, який забезпечує безпосереднє перетворення електричної енергії з акумуляторної батареї у механічну енергію обертання коліс. Його значення є визначальним, оскільки саме від характеристик електроприводу залежать такі ключові параметри як:

- динаміка розгону та максимальна швидкість,
- ефективність енергоспоживання (Wh/км),
- дальність ходу на одному заряді,
- можливість рекуперації енергії під час гальмування,
- рівень шуму, вібрацій та комфорт під час експлуатації.

Сучасні тягові електроприводи складаються з декількох основних компонентів:

- електрична машина (асинхронна, синхронна з постійними магнітами, реактивна),
- інвертор (силовий електронний перетворювач),
- контролер керування (впроваджує алгоритми керування моментом, швидкістю, рекуперацією),
- датчики (положення ротора, струмів, температури тощо).

Найбільш розповсюдженими типами є:

- Асинхронні двигуни (АСІМ) — відомі своєю надійністю та простотою конструкції. Їх застосовували в перших версіях Tesla Model S.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) — забезпечують високу ефективність і щільність потужності, використовуються у більшості сучасних моделей.

- Реактивні двигуни з перемикаючими обмотками (SRM) — мають просту конструкцію, високу температурну стійкість, але потребують складного керування через високий рівень шуму.

Роль тягового електроприводу виходить за межі простої трансмісії: він також є інтелектуальним елементом системи, здатним адаптуватися до дорожніх умов, режимів руху та навіть впливати на стратегію зарядки/розрядки акумуляторної системи. Завдяки системі рекуперативного гальмування, електропривід дозволяє частково відновлювати енергію під час гальмування, що суттєво підвищує загальну ефективність ЕМ.

У порівнянні з традиційними приводами, електроприводи мають менше механічних втрат, компактнішу конструкцію, менше точок зносу, що робить їх більш довговічними і придатними до широкої автоматизації виробництва.

У світовій практиці спостерігається тренд до інтеграції електроприводу в колісні модулі (інвельний привід), що знижує потребу в традиційній трансмісії та дозволяє реалізувати нові архітектури шасі.

Отже, дослідження конструкції, динаміки та способів керування тяговим електроприводом є не лише актуальним, а й необхідним етапом для подальшого розвитку електромобільної техніки як ключового напрямку сталої мобільності.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Тяговий електропривод є ключовим компонентом електромобіля, що відповідає за перетворення електричної енергії в механічну для забезпечення руху транспортного засобу. Вибір оптимального типу електроприводу визначає ефективність, надійність та експлуатаційні характеристики електромобіля.

1.1 Класифікація тягових електроприводів

За типом електродвигуна [3-5]:

- Асинхронні двигуни змінного струму (АСІМ): Широко використовуються завдяки простоті конструкції та низькій вартості. Наприклад, Tesla Model S застосовує асинхронний двигун на задній осі.
- Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM): Забезпечують високу ефективність та щільність потужності. Tesla Model 3 використовує PMSM на передній осі. ELAKPI.
- Безщіткові двигуни постійного струму (BLDC): Характеризуються високою ефективністю та надійністю. Використовуються в багатьох сучасних електромобілях.
- Вентильні реактивні двигуни (SRM): Мають просту конструкцію та високу надійність, але потребують складних систем керування.

За схемою передачі:

- З редуктором: Використовуються для зменшення обертів двигуна до необхідного рівня для приводу коліс.
- Безредукторні (прямий привід): Двигун безпосередньо з'єднаний з колесами, що зменшує втрати енергії та підвищує ефективність.

Tesla активно використовує як асинхронні, так і синхронні двигуни з постійними магнітами. Наприклад, Model S оснащена асинхронним двигуном, тоді як Model 3 використовує PMSM. Це дозволяє оптимізувати ефективність та динамічні характеристики автомобіля.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Nissan Leaf оснащений синхронним двигуном з внутрішніми постійними магнітами, що забезпечує високу ефективність та надійність.

Audi e-tron використовує два асинхронних двигуни на передній та задній осях, забезпечуючи повний привід та високу динаміку руху.

Китайська компанія BYD застосовує BLDC та PMSM двигуни в своїх електромобілях, орієнтуючись на масовий ринок та забезпечуючи баланс між вартістю та ефективністю [6].

Таблиця 1.1 - Основні технічні характеристики

Модель	Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Крутний момент, Н·м	Особливості
Tesla Model 3	PMSM	150–211	350–400	420	Висока ефективність, інвертор SiC
Nissan Leaf	PMSM	110	360	320	Проста конструкція
BYD Dolphin	BLDC	70–100	320	180–250	Доступний масовий сегмент
Audi e-tron	ACIM	300	396	664	Повний привід, високий комфорт
BYD Han	PMSM + ACIM	360	360	450	SiC-інвертор, плавність керування
Rivian R1T	4× індивідуальні	588	400	1120	Танковий поворот, torque vectoring

Також треба відмітити, що існують інтегровані електроприводи (EDU): Поєднання двигуна, інвертора та редуктора в одному корпусі для зменшення габаритів та ваги.

Використання SiC та GaN інверторів забезпечують вищу ефективність та менші втрати енергії порівняно з традиційними кремнієвими інверторами.

Високовольтні системи (800 В) зменшують струмові навантаження та дозволяють швидше заряджати акумулятори.

Існують також колісні двигуни, це інтеграція двигунів безпосередньо в колеса для покращення керованості та зменшення втрат енергії.

1.2 Тяговий асинхронний двигун (АС індукційний двигун)

Асинхронний двигун (англ. *AC induction motor*) — це електричний двигун змінного струму, в якому ротор не має постійних магнітів і не підключений до джерела живлення напругу. Обертове магнітне поле створюється у статорі, а ротор «наздоганяє» це поле за рахунок явища електромагнітної індукції [7].

Статор має обмотки, які живляться змінним струмом. Це створює обертове магнітне поле. У роторі (звичайно білкоподібному, тобто «короткозамкнутому») наводяться струми, що створюють своє магнітне поле. Взаємодія цих полів створює обертальний момент.

Переваги для електромобілів [8-12]:

- Надійність і простота конструкції;
- Низька вартість виробництва (немає рідкоземельних матеріалів, як у PMSM);
- Добре працює в жорстких умовах (перегрів, пил, волога);
- Широкий діапазон швидкостей;
- Можливість рекуперативного гальмування.

Недоліки АД:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Нижча ефективність у порівнянні з синхронними двигунами на постійних магнітах (особливо на малих навантаженнях).
- Необхідність складнішого керування (частотний перетворювач/інвертор).
- Більше втрат на нагрів через індукційні струми.

Tesla Model S/X (до 2019 року) — використовували задній асинхронний двигун потужністю до 360 кВт. Chevrolet Spark EV — 105 кВт асинхронний мотор. Renault Fluence Z.E. — також використовував індукційний двигун потужністю 70 кВт. Rivian R1T/R1S (ранні версії) — застосовували незалежні індукційні двигуни на кожному колесі.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики прикладу
(Tesla Model S задній мотор):

Параметр	Значення
Тип двигуна	Трифазний асинхронний індукційний
Потужність	до 360 кВт
Напруга системи	400 В
Максимальний момент	до 600 Н·м
Охолодження	Рідинне
Керування	Інвертор на IGBT або SiC транзисторах

Керування асинхронним приводом здійснюється через частотне керування (інвертор змінює частоту живлення статора). Також є векторне керування (FOC – Field-Oriented Control) для точного контролю моменту і швидкості.

Асинхронні двигуни поступаються PMSM за ККД, але: їх активно застосовують у задньопривідних або вторинних приводах (наприклад, у парі з PMSM у передній осі). Tesla у Model 3 використовує комбінацію: PMSM спереду, асинхронний двигун ззаду [9].

1.3 Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації

Основні технічні вимоги до електроприводу:

- електропривід повинен забезпечувати мінімальні втрати при перетворенні енергії;
- ккд системи (інвертор + електродвигун) має становити понад 90% у робочому діапазоні;
- електропривід має бути компактним і легким, щоб не обтяжувати конструкцію авто;
- чим більша питома потужність — тим краще для динаміки і розміщення у кузові;
- повинен працювати стабільно у широкому діапазоні швидкостей обертання ротора — від низьких (при старті) до дуже високих (на шосе);
- розрахований на десятки тисяч годин безперервної роботи;
- стійкий до вібрацій, пилу, вологи, температурних коливань.

1). Енергетичні та функціональні вимоги

Електропривід повинен забезпечувати рекуперативне гальмування — повернення енергії до батареї під час сповільнення.

Миттєва реакція на зміну команд — важливо для керованості, безпеки та відчуття педалі. Необхідне плавне та точне керування крутним моментом як у русі, так і на холостому ході (наприклад, при русі у заторі).

2) Вимоги до керування передбачає векторне або пряме керування. Має бути підтримка сучасних алгоритмів керування: FOC (field-oriented control), DTC (direct torque control), що забезпечують високу точність та ефективність. Можливість інтеграції з ECU (електронними блоками керування). Підтримка

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

CAN-шини, обмін з іншими компонентами авто (батарея, BMS, гальмівна система тощо).

3) Обов'язкові функції:

- захист від перевантаження, перегріву,
- самодіагностика,
- аварійне відключення.

4) Температурна стійкість. Робочий діапазон температур: від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ (і більше для інвертора та двигуна).

Наявність систем охолодження:

- повітряного (для економ-сегменту),
- рідинного (для високопродуктивних авто, як Tesla, Porsche Taycan тощо).

5) Сервісопридатність і уніфікація

Простота в обслуговуванні (в ідеалі – без потреби сервісу протягом усього ресурсу). Можливість використання у різних моделях авто – через модульну або платформену архітектуру (наприклад, VW MEB).

6.) Екологічні та виробничі вимоги.

Мінімальне використання дефіцитних матеріалів, а також висока відновлюваність і утилізація компонентів. Бажано енергоефективне масове виробництво з низьким вуглецевим слідом.

Від основних характеристик електроприводу залежать такі ключові параметри як:

- динаміка розгону та максимальна швидкість,
- ефективність енергоспоживання (Wh/км),
- дальність ходу на одному заряді,
- можливість рекуперації енергії під час гальмування,
- рівень шуму, вібрацій та комфорт під час експлуатації.

Роль тягового електроприводу виходить за межі простої трансмісії: він також є інтелектуальним елементом системи, здатним адаптуватися до дорожніх

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

умов, режимів руху та навіть впливати на стратегію зарядки/розрядки акумуляторної системи.

1.4 Аналіз існуючих систем електроприводу для електротранспорту

Відоме використання маховичних накопичувачів, як альтернативного способу джерела енергії у спортивних та гоночних автомобілях, а також у міських автобусах наступними автовиробничими корпораціями Jaguar XF, Porsche GT3 R Hybrid. Значної досконалості сучасним маховичним системам і варіаторам надав творець маховиків проф. Н.В. Гуліа. У ХНАДУ [17] розроблена маховична система для гібридного транспортного засобу та електромобіля. Ця маховична система поліпшує показники рекуперативного гальмування та розгону (рис.1.1, 1.2). Використання маховичної системи рекуперативного гальмування дає можливість значно збільшити ресурс та довговічність ТЗ, в тому числі ККД автотранспортного засобу. Коли здійснюється гальмування або рух за інерцією електричні машини починають працювати як генератори і тим самим перетворюють рекуперативну механічну енергію в електричну, яка далі використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї. Одним із перспективних шляхів є застосування іоністорів (суперконденсаторів) для зберігання і подальшого використання збереженої електричної енергії. При створенні автомобіля ХНАДУ [17] в його силовій установці були задіяні автомобільні свинцево-кислотні акумулятори ємністю 100 А·год кожна. Відповідно, для забезпечення потрібних параметрів напруги живлення та ємності акумуляторні батареї з'єднувалися послідовно-паралельно. В свою чергу, для значного поліпшення технічних характеристик акумуляторних батарей, що застосовувалися, паралельно їм приєднувався імпульсний конденсатор С великої ємності, наприклад ІКЕ 40-28 (іоністор, рис.1.3) [17]. В автомобільній практиці цей конденсатор великої ємності ІКЕ 40-28 часто буває задіяний для полегшення пуску ДВЗ великовантажних автомобілів в важких умовах експлуатації особливо при сильних морозах, а також – коли сильно розряджена батарея. В даному

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

випадку конденсатор значно зменшує при пуску початковий струм акумуляторних батареї, що в результаті термін її служби збільшується в декілька разів. Крім того, конденсатор найбільш прийнятний, бо він на відміну від АКБ як швидко віддає накопичену енергію, так швидко її і поглинає що дає можливість найбільш продуктивно бути задіяним при використанні рекуперативної енергії, отриманої в результаті гальмування транспортного засобу.



Рисунок 1.1 – Схема роботи мехатронного накопичувача енергії (рекуперативне гальмування) [17]



Рисунок 1.2 – Схема роботи мехатронного накопичувача енергії (розгін автомобіля) [17]

Система об'єднаного управління динамічними параметрами автомобіля реалізує спільну взаємодію всіх систем між собою без функціональних пропусків, що приводять до певних проблем. А гальмівна система вступає в дію до настання критичної миті, коли момент досягає максимального значення, чим забезпечує плавність руху автомобіля, високий рівень керованості та безпеки руху авто. Контролер кола високої напруги призначений слідкувати за роботою перетворювача постійної напруги. Перетворювач постійної напруги, по команді контролера високої напруги, підвищує номінальну напругу високовольної батареї, наприклад, з 288 В до найбільшого значення 650. [17] Інвертор перетворює напругу, що виробляється електричним генератором. Перетворювач постійної напруги, по команді контролера кола високої напруги, знижує максимальну напругу 650 В до номінальної напруги 288 В (для заряджання високовольної батареї). Такі дії впливають на роботи електроприводу.

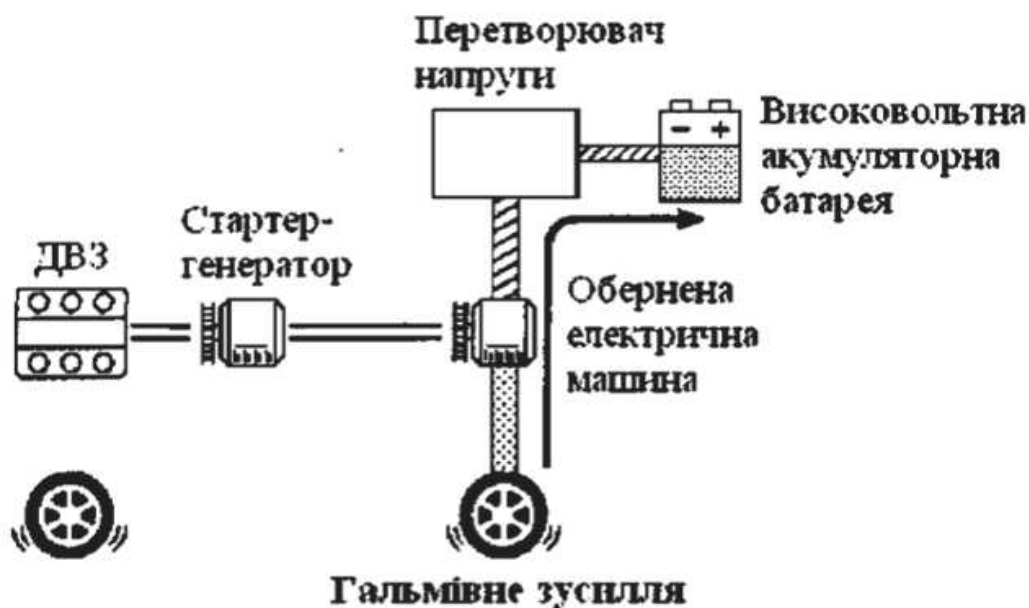


Рисунок 1.3 – Схема рекуперативного гальмування [17]

Математична модель системи автоматичного керування була отримана в [17] для Т-подібної еквівалентної схеми (рисунок 1.4). Перетворення параметрів з L-подібної схеми в Т-подібну схему здійснюється відповідно до [18] і показано на рис.1.5.

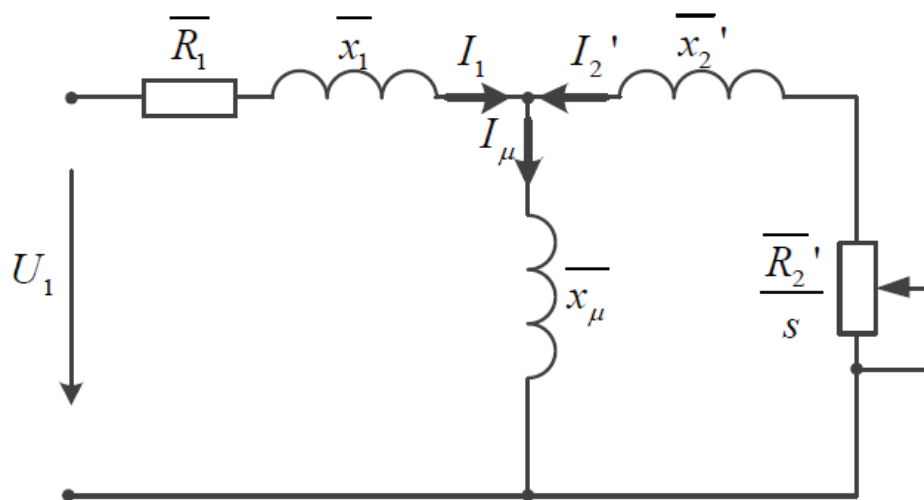


Рисунок 1.4 - Т-подібна схема заміщення АД [18]

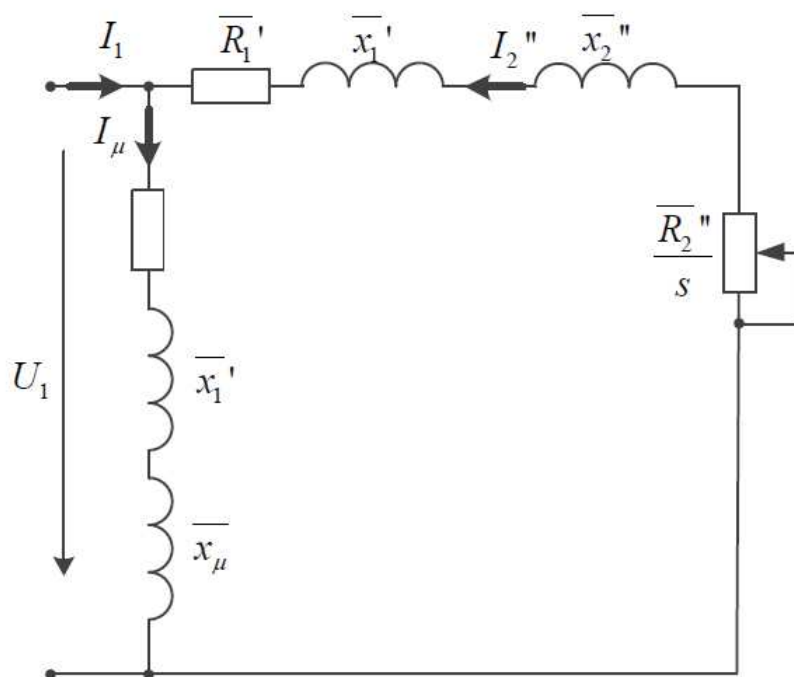


Рисунок 1.5 - Г-подібна схема заміщення АД [18]

Модель має враховувати режим рекуперативного гальмування, де двигун діє як генератор і заряджає батарею. Необхідно врахувати обмеження на струм інвертора, напругу батареї, перегрів.

Модель інвертора (наприклад, 2-рівневий ШІМ), повинна мати перетворення координат (Clark, Park, Inverse Park), двигун у d-q координатах. Модель акумулятора (напруга, SOC, струм).

Моделі FOC (Field-Oriented Control) мають регулятори струму, швидкості, включаючи систему зв'язаних ОДУ (диференціальні рівняння). Модель потребує дискретизації керування і часто реалізується у вигляді блокової діаграми (Simulink) або з використанням Simscape Electrical.

Варіант такого моделювання показано на рис.1.6.

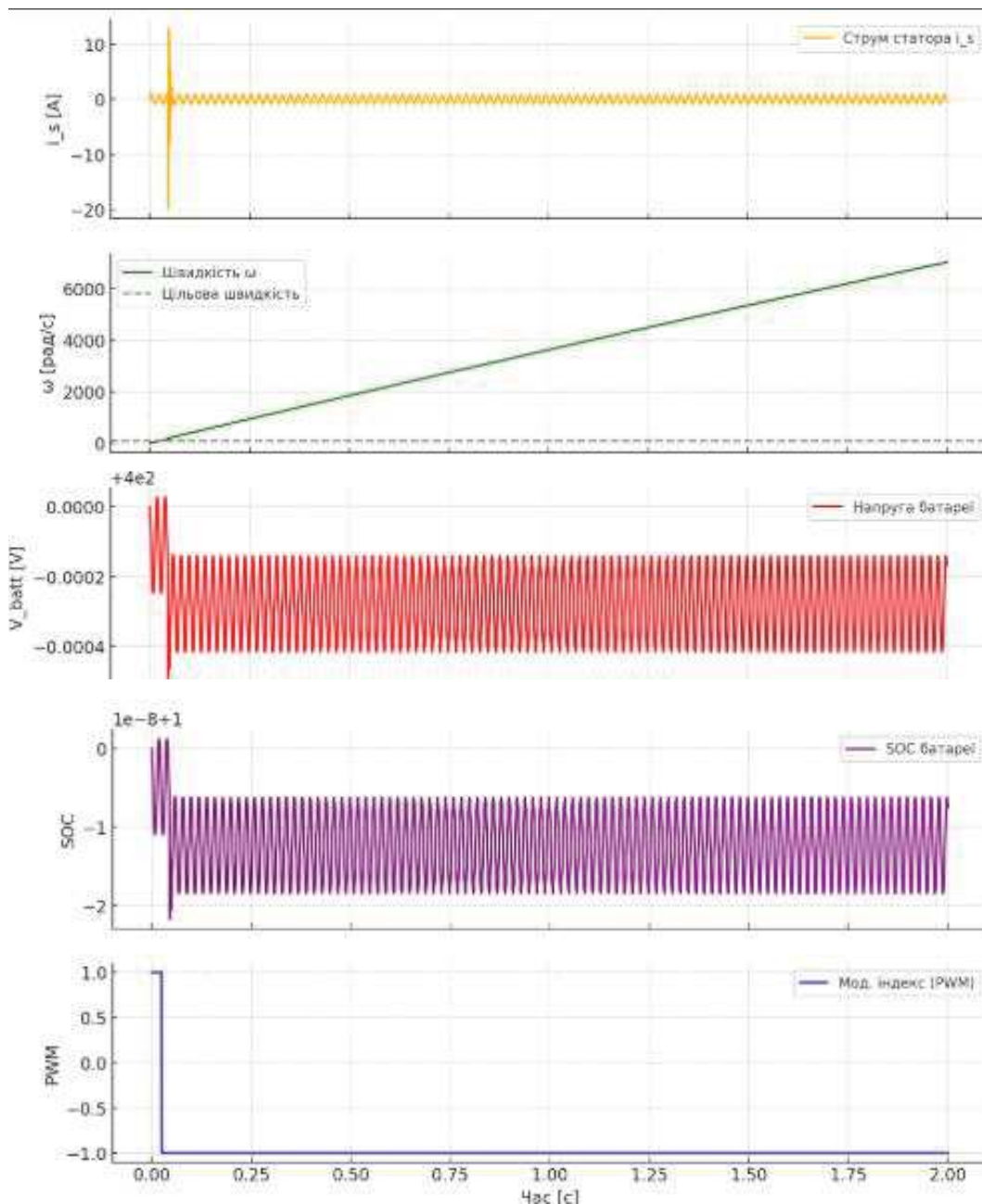


Рисунок 1.6 – Моделювання: струм статора та ротора та коливальні процеси із затуханням, характерні для запуску.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

З рис. 1.6 видно , що кутова швидкість зростає внаслідок електромагнітного моменту. Напруга батареї повільно знижується через внутрішній опір під навантаженням.

Це спрощена модель, яка вже враховує батарею, інвертор (через ШІМ-модуляцію), і двигун.

1.5 Висновки до першого розділу

Сучасні тягові електроприводи для електромобілів демонструють значний прогрес у напрямку підвищення ефективності, надійності та зменшення габаритів. Вибір типу двигуна та схеми передачі залежить від призначення автомобіля, вимог до динаміки, вартості та інших факторів. Подальший розвиток технологій, таких як інтегровані електроприводи та використання нових матеріалів в інверторах, сприятиме покращенню характеристик електромобілів та їх широкому впровадженню.

Отже при роботі з технічними системами буде найкращий вибір саме лінійних систем керування.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

2. МОДУЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Розробка моделі АТД

Структура моделі асинхронного тягового приводу показано на рис.2.1.

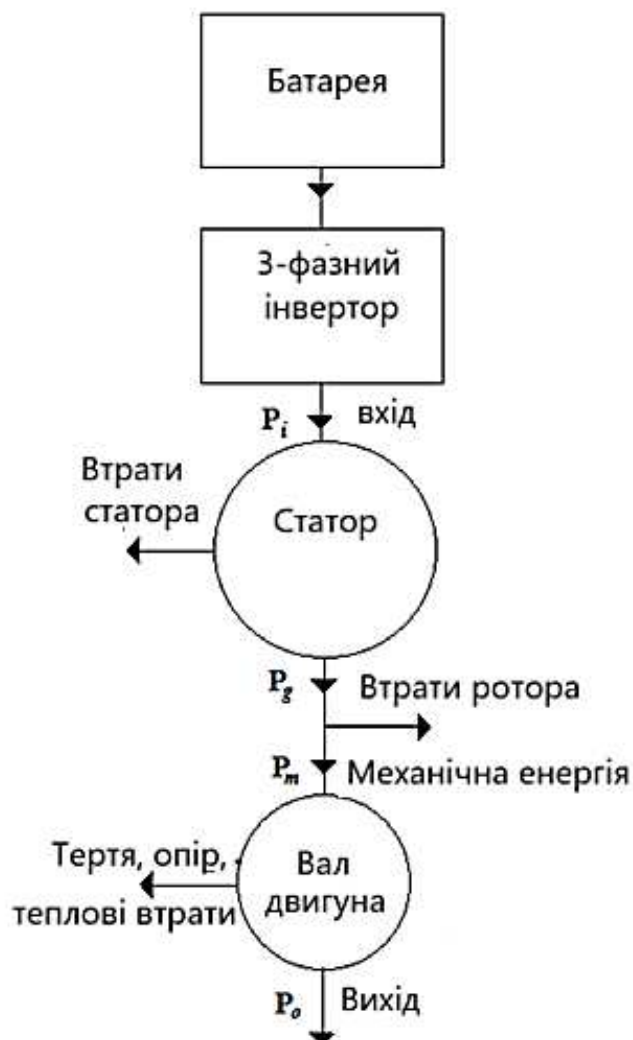


Рисунок 2.1 – проект системи асинхронного приводу.

Розроблена модель асинхронного двигуна у Ansys представлена на рис.2.2.

На рисунку 2.3 показано вигляд моделі асинхронного двигуна збоку.

Напруга живлення 360 В, 3 фази. Частота обертання робота – 10000 об/хв.

Ротор двигуна виконано з можливістю розташування на задній осі електротранспорту. Довжина – 300 мм.

Загальний вигляд 3Д моделі показано на рис.2.4.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Slot Type: Parallel Tooth Top Bar: Parallel Tooth
 Bottom Bar: None
 Stator Ducts: None Rotor Ducts: None

Stator Parameters	Value	Rotor Parameters	Value
Slot Number	60	Rotor Bars	36
Stator Lam Dia	130	Pole Number	4
Stator Bore	80	Bar Opening [T]	1.5
Tooth Width	5	Bar Opening Depth [T]	1.5
Slot Depth	18	Bar Tip Angle [T]	20
Slot Corner Radius	0	Rotor Tooth Width [T]	4
Tooth Tip Depth	1	Bar Depth [T]	10
Slot Opening	3	Bar Corner Radius [T]	0.434
Tooth Tip Angle	30	Airgap	1
Sleeve Thickness	0	Banding Thickness	0
		Shaft Dia	25
		Shaft Hole Diameter	0

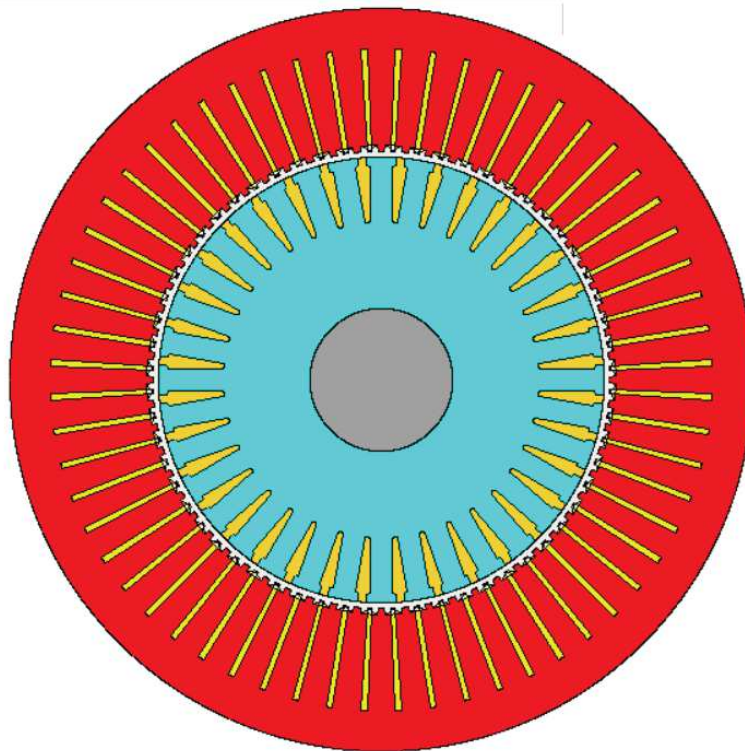


Рисунок 2.2- Модель асинхронного двигуна

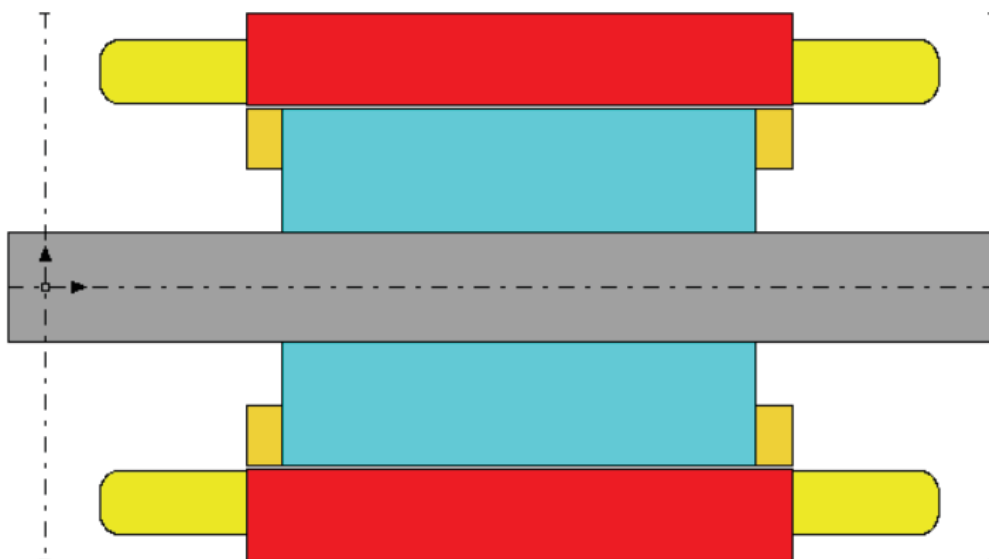


Рисунок 2.3 - Модель асинхронного двигуна (вигляд збоку)

Параметри моделі представлені у таблиці на рис.2.5 та на БРМА 25.00.00.000 РР. Еквівалентна модель для розрахунків показана на рис. 2.6
 Розташування перетину фаз обмоток показано на рис.2.7

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

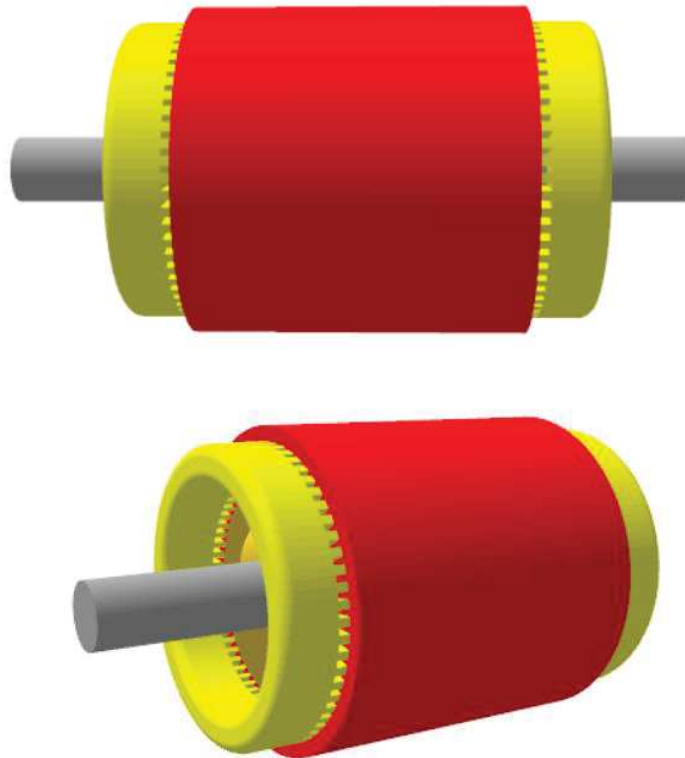
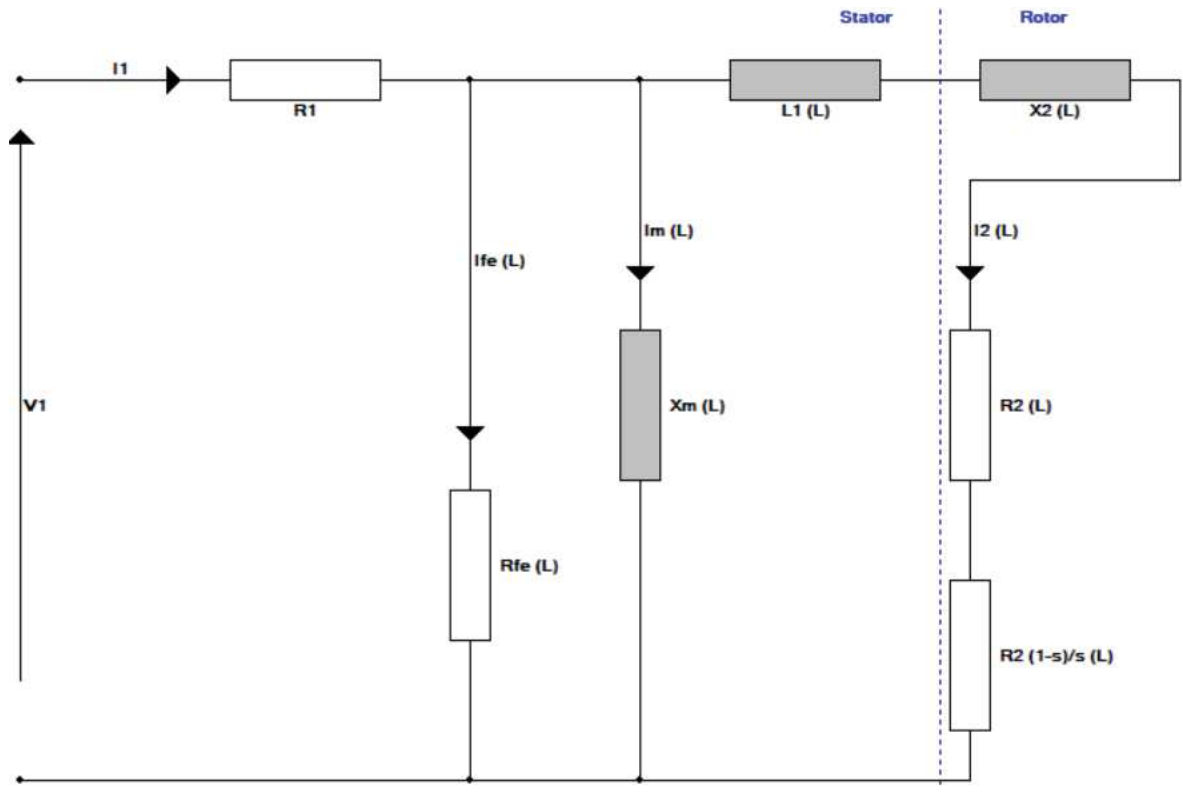


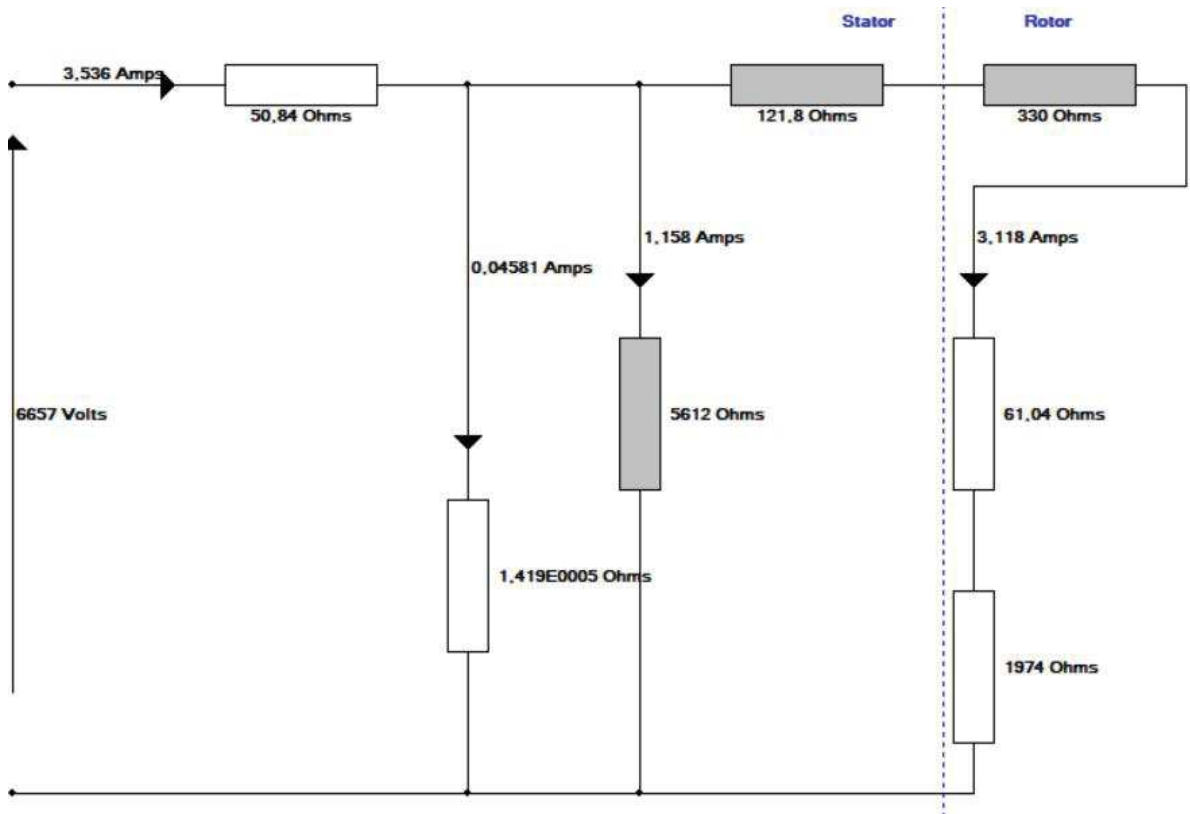
Рисунок 2.4 – 3Д модель двигуна

Radial Dimensions	Value	Axial Dimensions	Value
Stator Lam Dia	150	Motor Length	300
Stator Bore	100	Stator Lam Length	150
Airgap	1	Rotor Lam Length	130
Banding Thickness	0	EWdg Overhang [F]	30
Sleeve Thickness	0	EWdg Overhang [R]	30
EndRing Add [Outer F]	0	Wdg Extension [F]	5
EndRing Add [Inner F]	5	Wdg Extension [R]	5
EndRing Add [Outer R]	0	EndRing Thickness [F]	10
EndRing Add [Inner R]	5	EndRing Thickness [R]	10
Shaft Dia	30	EndRing Extension [F]	0
Shaft Dia [F]	30	EndRing Extension [R]	0
Shaft Dia [R]	30	Shaft Extension [F]	10
Shaft Hole Diameter	0	Shaft Extension [R]	0

Рисунок 2.5 – Основні показники двигуна



а)



б)

Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема електроприводу: а загальні позначення, б) номінальні позначення елементів схеми

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

21

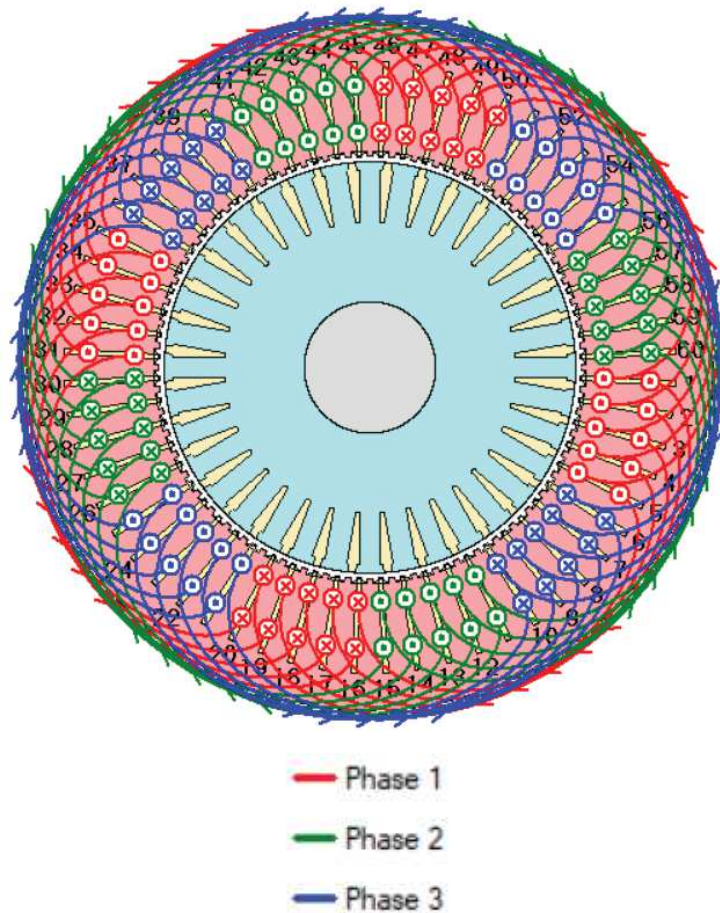


Рисунок 2.7 Розташування фаз обмоток електричного двигуна

Розрахунки здійснювали за умови незмінності частоти обертання, що забезпечується системою керування [12–16]. Критерієм коректності розрахунку АТД є отримання при підтримуваній системою керування номінальної частоти обертання потужності на валу, що дорівнює своєму номінальному значенню. На рис. 2.8 наведено залежність ККД від кута навантаження.

Розрахунок розподілу електромагнітного поля, та навіть аналіз електромеханічного перехідного процесу пуску двигуна виконувався у програмі Ansys MotorCAD [21]. Картина магнітно-силових ліній у перерізі АТД наведена на рис. 2.9.

Отримана електрична потужність склала 62,5 кВт. Тяговий момент 550 Нм, Пікова навантаження до 890 Нм.

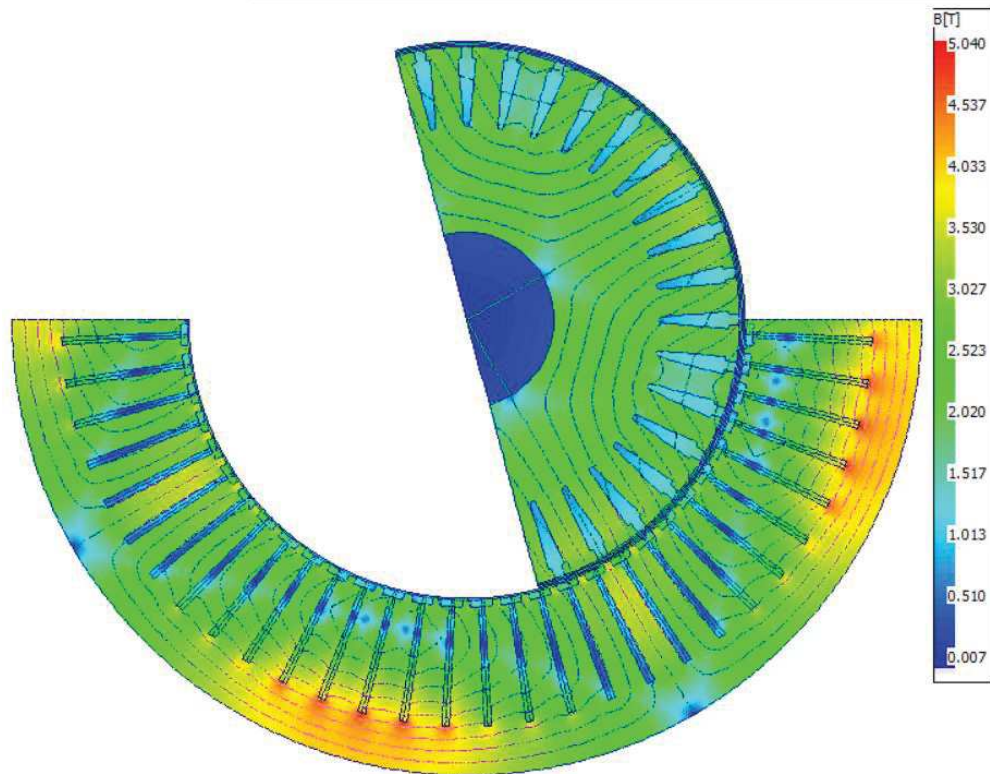


Рисунок 2.9 - Розрахунок розподілу електромагнітного поля

Математичне моделювання електромеханічного перехідного процесу пуску двигуна виконувалось у програмі Ansys з використанням розрахункового об'єкта двигуна [13]. Результати математичного моделювання подано на рис. 2.10.

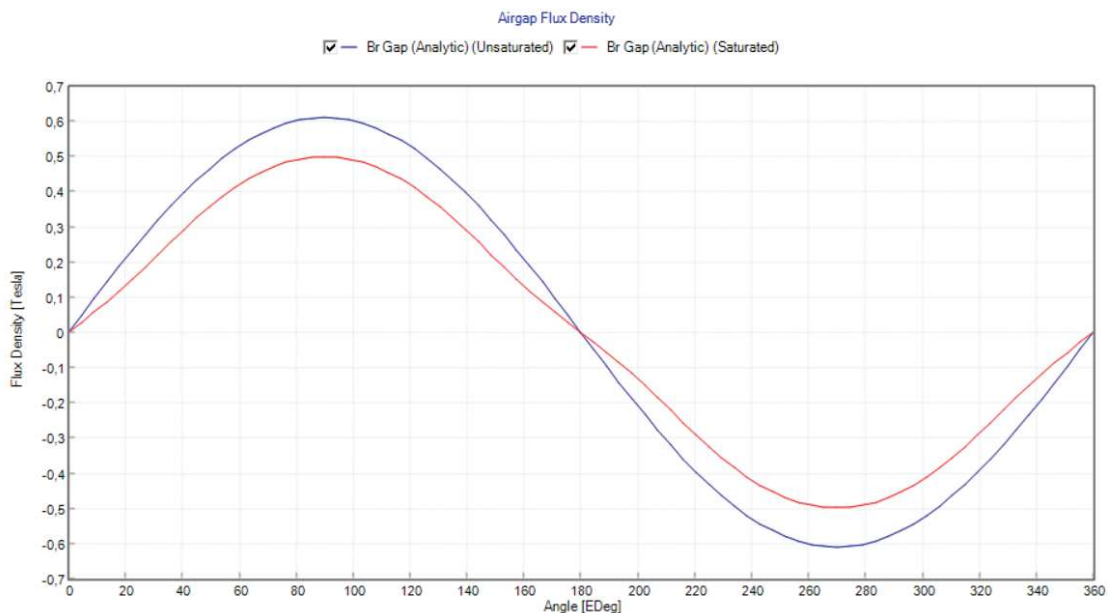


Рисунок 2.10 – Розрахункові дані щільності магнітного поля для моделі асинхронного двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розрахункові дані магнітного опору для моделі асинхронного двигуна показано на рис.2.11.

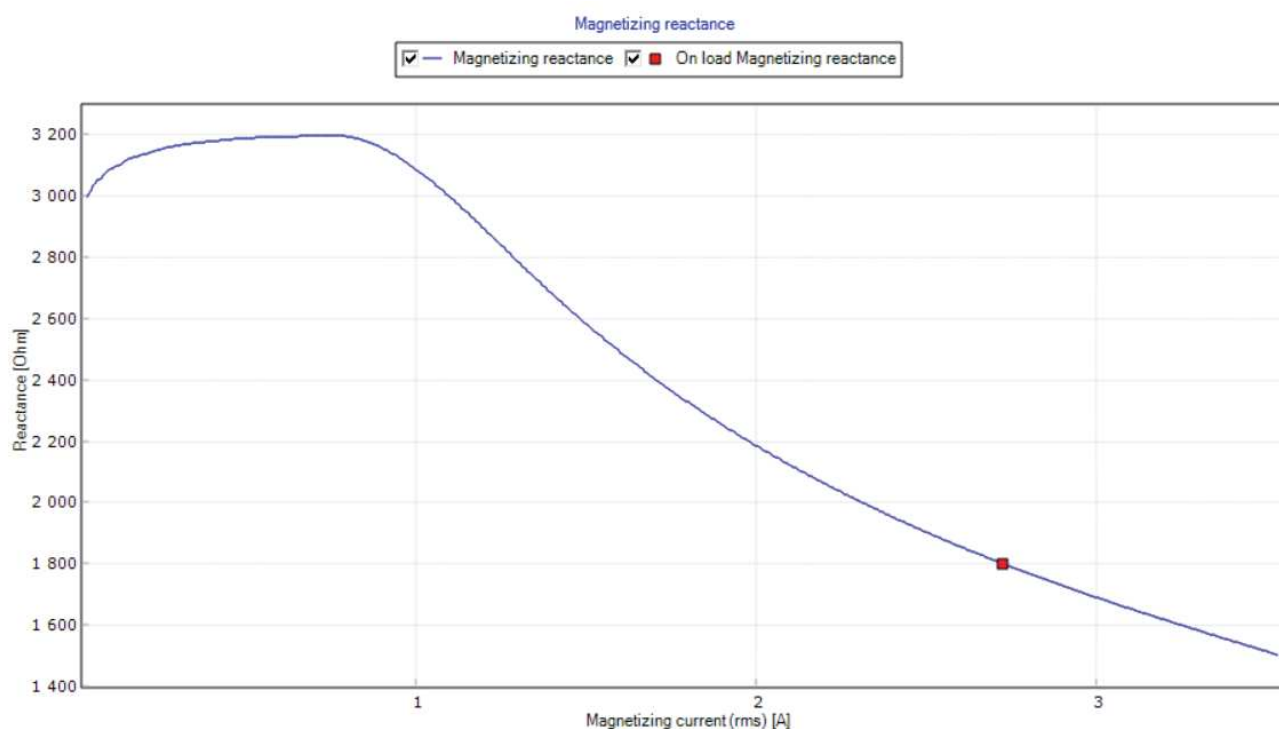


Рисунок 2.11 – Розрахункові дані магнітного опору для моделі асинхронного двигуна

Файл проєкту АТМ було експортовано до програми MotorCAD для проведення теплового розрахунку СДПМ [9]. Зроблений тепловий розрахунок показав, що найбільше перевищення обмотки статора в усталеному режимі, при обертанні ротора з номінальною швидкістю не перевищує 180⁰С. (Рис.2.12) Однак це показує необхідність зовнішнього охолодження.

Проблемні зони видно на рис.2.13. Це зовнішні сторони, що випромінюють до 5 Вт тепла. Отже рідинне охолодження буде цілком достатньо для такого двигуна.

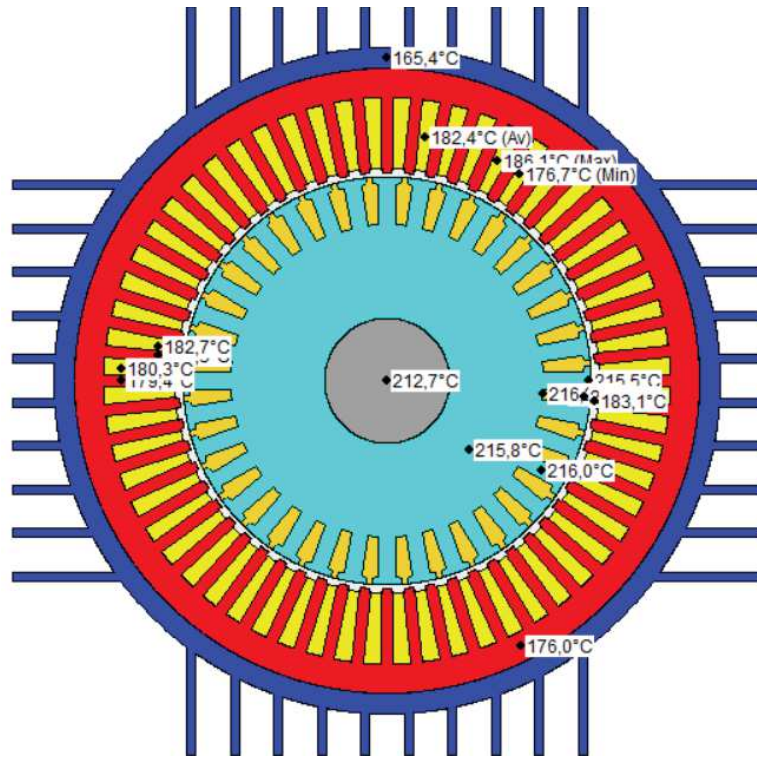


Рисунок 2.12 – Теплова модель асинхронного тягового двигуна

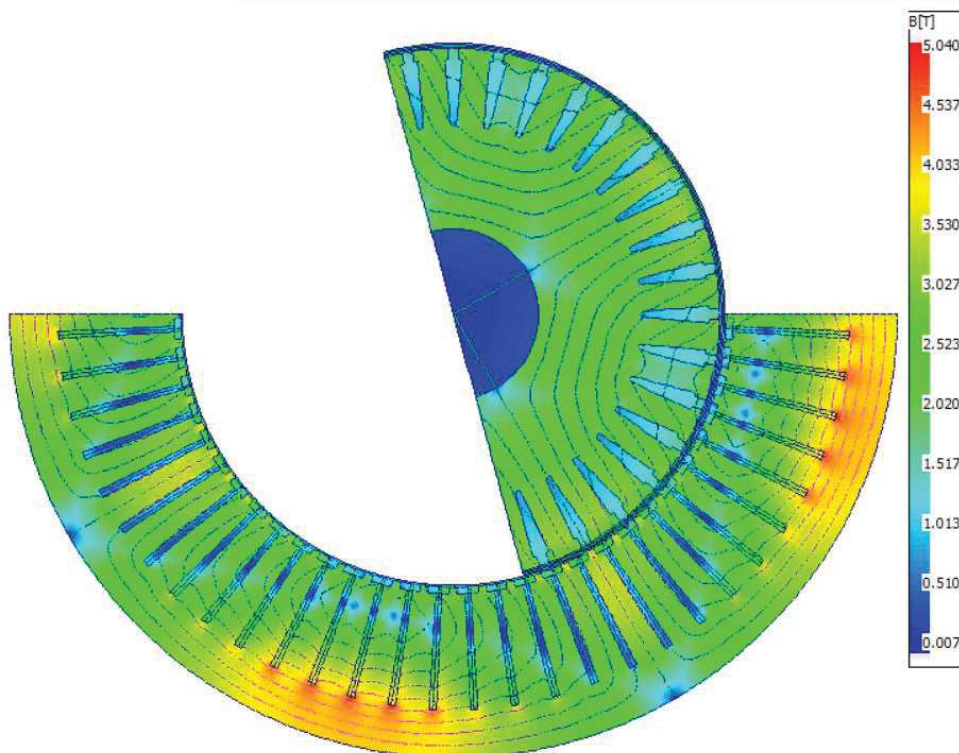


Рисунок 2.13 – Теплові зони, що потребують охолодження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.2 Вихідне диференціальне рівняння АТД та його аналітичне розв'язання

Диференціальні рівняння ланцюгів статора та (короткозамкненого) ротора у векторній (комплексній) формі АТД та схема заміни машини для перехідних електромагнітних процесів у цих ланцюгах наведені [22]:

$$u_s = R_1 i_s + \frac{d\psi_1}{dt}, \quad (2.1)$$

$$0 = R_2 i_R + \frac{d\psi_2}{dt} - I\omega\psi_2. \quad (2.2)$$

В рівняннях (2.1), (2.2): u_s, i_s, ψ_1 – результуючі вектори напруги, струму та потокозчеплення статора, рівні амплітудам фазних величин; i_R, ψ_2 – результуючі вектори струму та потокозчеплення ротора; R_1, R_2 – активні опори фаз статора та ротора; I – уявна одиниця t – незалежна змінна (час); ω – частота обертання АД.

Струми статора і ротора виражаються через потокозчеплення формулами (2.3) і у рівняннях (2.1), (2.2): u_s, i_s, ψ_1 – результуючі вектори струму та потокозчеплення ротора; i_R, ψ_2 – результуючі вектори струму і потокозчеплення ротора; R_1, R_2 – активні опори фаз статора та ротора; I – мнима одиниця; t – незалежна змінна (година); ω – частота обертання.

Струми статора і ротора виражаються через потокозчеплення формулами (2.3) і (2.4) [22]:

$$i_s = \frac{L_2\psi_1 - L_{12}\psi_2}{L_1L_2 - L_{12}^2}, \quad (2.3)$$

$$i_R = \frac{L_1\psi_2 - L_{12}\psi_1}{L_1L_2 - L_{12}^2} \quad (2.4)$$

де L_1, L_2, L_{12} – індуктивності обмоток статора, ротора та їх взаємна індуктивність.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підстановка (2.3) і (2.4) в (2.1) і (2.2) та подальше виключення з отриманих рівнянь потокозчеплення статора дозволяє скласти диф.рівняння другого порядку щодо потокозчеплення ротора:

$$a\tau^2 u_s = \frac{d^2\psi_2}{dt^2} + \tau a_1 \frac{d\psi_2}{dt} + \tau^2 a_2 \psi_2, \quad (2.5)$$

де постійні коефіцієнти, що залежать від параметрів АД:

$$a = \frac{R_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}, \quad (2.6)$$

$$a_1 = \frac{R_2 L_1 + R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2}, \quad (2.7)$$

$$a_2 = \frac{R_1(R_2 - \omega L_2 I)}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \quad (2.8)$$

У рівнянні (2.5) незалежна змінна t виражена у відносних одиницях, нова одиниця часу дорівнює τ - інтервал часу між двома послідовними комутаціями напруги (струму) інвертора.

Рішення рівняння (2.5) для n -го міжкомутаційного інтервалу має вигляд [23]:

$$\psi_2(t) = \frac{au_n}{a_2} + A_n e^{p_1(t-n)} + B_n e^{p_2(t-n)}, \quad (2.9)$$

де вектор напруження

$$u_n = \frac{2}{3} u_d e^{(1/3)I\pi n}, \quad (2.10)$$

A_n, B_n – постійні на n -му міжкомутаційному інтервалі; u_d – постійна напруга на вході АІН; коріння характеристичного рівняння ДУ (2.5):

$$p_1 = \tau \left(-\frac{1}{2}a_1 + \frac{1}{2}\sqrt{a_1^2 - 4a_2} \right), p_2 = \tau \left(-\frac{1}{2}a_1 - \frac{1}{2}\sqrt{a_1^2 - 4a_2} \right). \quad (2.11)$$

Коефіцієнти A_n, B_n визначаються з комутаційних умов на стику n -го та $(n+1)$ -го інтервалів комутації. Ці умови такі: поточозчеплення ротора та його перша похідна в процесі комутації при $t = n+1$ не можуть змінитися стрибком, що записується наступним чином:

$$\psi_2[n+1]_- = \psi_2[n+1]_+; \frac{d}{dt}(\psi_2[n+1]_-) = \frac{d}{dt}(\psi_2[n+1]_+). \quad (2.12)$$

Застосувавши згадані закони комутації, отримаємо, з урахуванням (2.9), різницеві рівняння (2.13) для визначення коефіцієнтів A_n, B_n :

$$\begin{aligned} A_{n+1} - A_n e^{p_1} &= A_0 e^{(1/3)I\pi n} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3} \right), \\ B_{n+1} - B_n e^{p_2} &= A_0 e^{(1/3)I\pi n} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3} \right), \end{aligned} \quad (2.13),$$

де

$$A_0 = \frac{2}{3} \frac{ap_2 u_d}{a_2(p_2 - p_1)}, B_0 = \frac{2}{3} \frac{ap_1 u_d}{a_2(p_1 - p_2)}. \quad (2.14)$$

Розв'язання цих різницевих рівнянь методом D-перетворення [23] здійснюється наступним чином (на прикладі розв'язання першого із рівнянь (2.13):

$$D\{A_{n+1}\} - D\{A_n e^{p_1}\} = D\{A_0 e^{(1/3)I\pi n} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3} \right)\}, \quad (2.15)$$

де

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D\{A_{n+1}\} = e^q A^*[q] - e^q A[0];$$

$$D\{A_n e^{p_1}\} = A^*[q] e^{p_1};$$

$$D\left\{A_0 e^{\left(\frac{1}{3}\right)I\pi n} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3}\right)\right\} = A[0] \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3}\right) \frac{e^q}{e^q - e^{(1/3)I\pi n}}, \quad (2.16)$$

Підстановка (2.16) (2.15) призводить до прямого D-перетворення першого рівняння (2.13):

$$A^*[q] = A[0] \frac{e^q}{e^q - e^{p_1}} + A[0] \left(e^{\left(\frac{1}{3}\right)I\pi n} - 1\right) \frac{e^q}{e^q - e^{(1/3)I\pi n}} (e^q - e^{p_1}) \quad (2.17)$$

Зворотнє перетворення рівняння (2.17), вираженого у зображеннях, дає в оригіналі рішення (2.18):

$$A_n = A_0 \left(e^{p_1 n} + \frac{\left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3}\right)(e^{p_1 n} - e^{(1/3)I\pi n})}{e^{p_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}I\sqrt{3}}} \right) \quad (2.18)$$

Аналогічно є коефіцієнт B_n (2.19):

$$B_n = B_0 \left(e^{p_2 n} + \frac{\left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3}\right)(e^{p_2 n} - e^{(1/3)I\pi n})}{e^{p_2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}I\sqrt{3}}} \right). \quad (2.19)$$

При $t \rightarrow \infty$, $n \rightarrow \infty$ експоненти $e^{p_1 n}$ і $e^{p_2 n}$ перетворюються на нуль, і електромагнітний процес встановлюється.

Далі розглядаємо лише усталені процеси з прикладу асинхронного тягового двигуна АТД.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

2.3 Формування вектору напружень

У трифазному АТД результуючий вектор напруги формується з фазної напруги за формулою:

$$u_S = \frac{2}{3}u_a + \frac{2}{3}\left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}I\sqrt{3}\right)u_b + \frac{2}{3}\left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}I\sqrt{3}\right)u_c. \quad (2.20)$$

Його годограф представлений на рисунках 2.14 та 2.15.

Зміна u_c показано на рис.2.16.

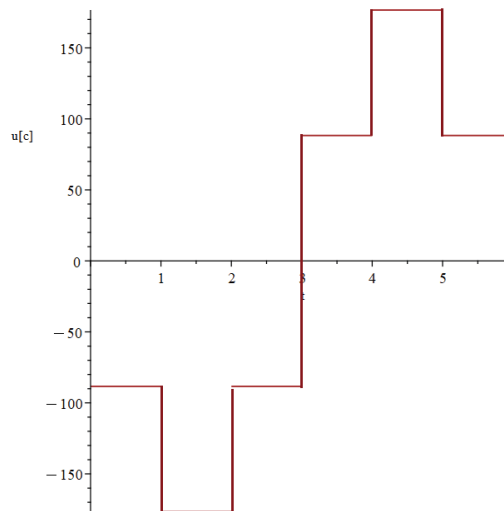


Рисунок 2.14 –Графік напружень статора

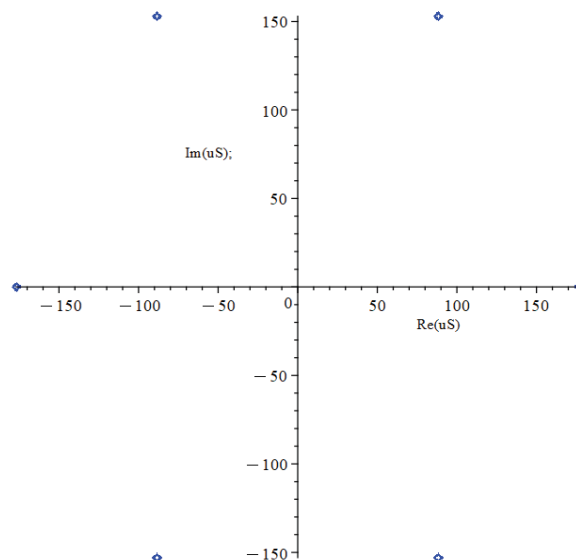


Рисунок 2.15 - Послідовні положення кінця вектору напруги у комплексній площині на одному полюсному розподілі АТД

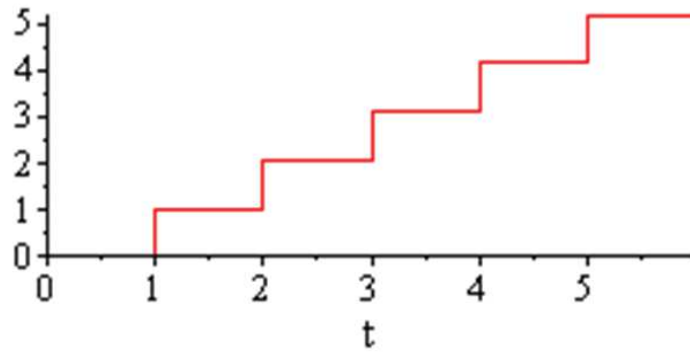


Рисунок 2.16 – Зміна фази вектору u_c у часі

З рисунків випливає, що вектор напруги u_s переміщається у просторі повітряного зазору АТ дискретними стрибками з кроком $\pi/3$, залишаючись нерухомим у кожному новому положенні протягом часу τ .

Нижче наводяться розрахункові формули для обчислення потокозчеплень, струмів та електромагнітного моменту АДТ при живленні від АІН зі 180-градусним управлінням ($\lambda = \pi$).

Потокозчеплення ротора:

$$\psi_2(t) = \frac{2}{3} \frac{1}{R_1(R_2 - I\omega L_2)} \left(u_d R_2 L_{12} e^{\frac{1}{3} I \pi n} \left(1 + \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3} \right) \left(\frac{p_2 e^{p_1(t-n)}}{(p_2 - p_1) \left(e^{p_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}} \right)} + \frac{p_1 e^{p_2(t-n)}}{(p_1 - p_2) \left(e^{p_2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}} \right)} \right) \right) \right) \quad (2.21)$$

Потокозчеплення статора:

$$\psi_1(t) = \frac{2}{3} \frac{1}{a_2} \left(b u_d e^{\frac{1}{3} I \pi n} \left(1 - \frac{1}{b \tau (p_1 - p_2)} \left(\left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3} \right) \left(\frac{(b \tau + p_1) p_2 e^{p_1(t-n)}}{e^{p_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}} + \frac{(b \tau + p_2) p_1 e^{p_2(t-n)}}{e^{p_2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}} \right) \right) \right) \right) \quad (2.22)$$

де

$$b = \frac{R_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} - I \omega.$$

Струм статора:

$$i_S = \frac{2}{3} \frac{1}{R_1} \left(u_d e^{\frac{1}{3} I \pi n} \left(1 + \frac{\left(1 + \frac{p_1 L_2}{\tau(R_2 - I \omega L_2)}\right) \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3}\right)}{(p_2 - p_1) \left(e^{p_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}\right)} + \frac{\left(1 + \frac{p_2 L_1}{\tau(R_2 - I \omega L_2)}\right) \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3}\right)}{(p_1 - p_2) \left(e^{p_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}\right)} \right) \right). \quad (2.23)$$

Електромагнітний момент:

$$M_E = m \frac{P}{2} \text{Im}(\text{conjugate}(\psi_1) i_S), \quad (2.24)$$

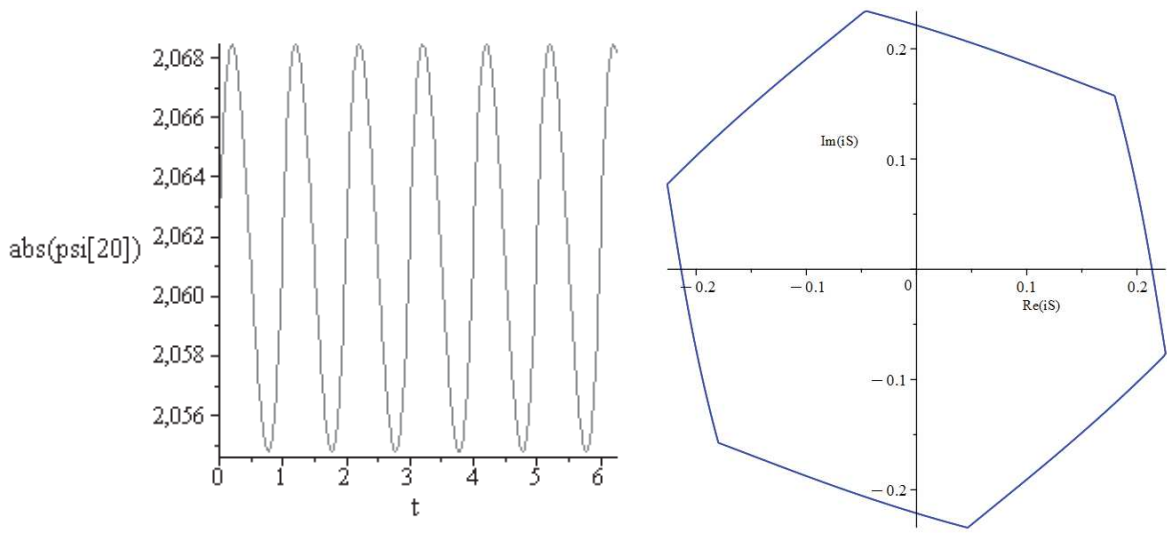
де $m = 3$ – число фаз, P – число пар полюсів АД; $\text{conjugate}(\psi_1)$ – пов'язане комплексне вираження поточкозчеплення статора.

Струм ротора:

$$i_R = \frac{1}{R_1(R_2 - I \omega L_2)} \left(\frac{2}{3} u_d \omega L_{12} e^{\frac{1}{3} I \pi n} \left(1 + \frac{\left(1 + \frac{I p_1}{\omega \tau}\right) \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3}\right) p_2 e^{p_1(t-n)}}{(p_2 - p_1) \left(e^{p_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}\right)} + \frac{\left(1 + \frac{I p_2}{\omega \tau}\right) \left(e^{\frac{1}{3} I \pi n} - 1\right) p_1 e^{p_2(t-n)}}{(p_1 - p_2) \left(e^{p_2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}\right)} \right) \right). \quad (2.25)$$

На рисунках 2.17-2.20 наведено результати розрахунків для режиму тяги з номінальним навантаженням.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

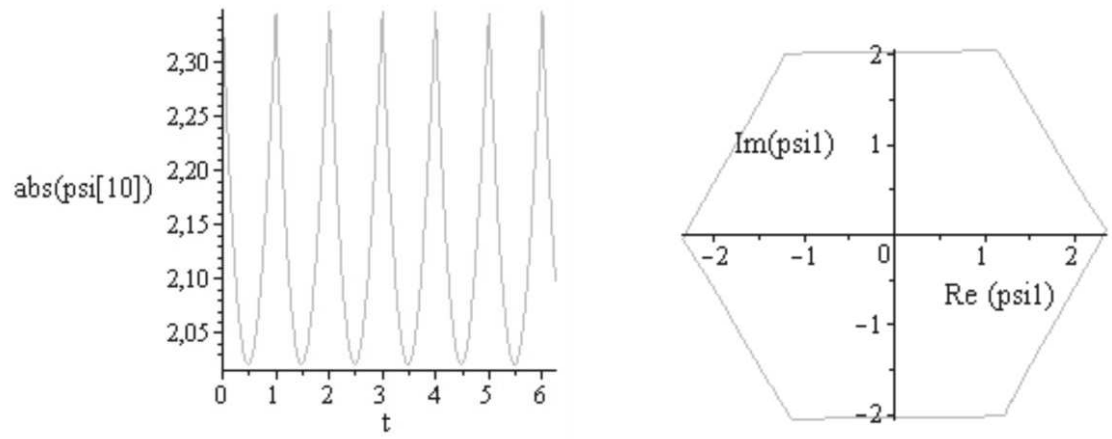


а)

б)

Рисунок 2.17 – Потокосцеплення ротора, Вб:

а) годограф; б) зміна абсолютного значення

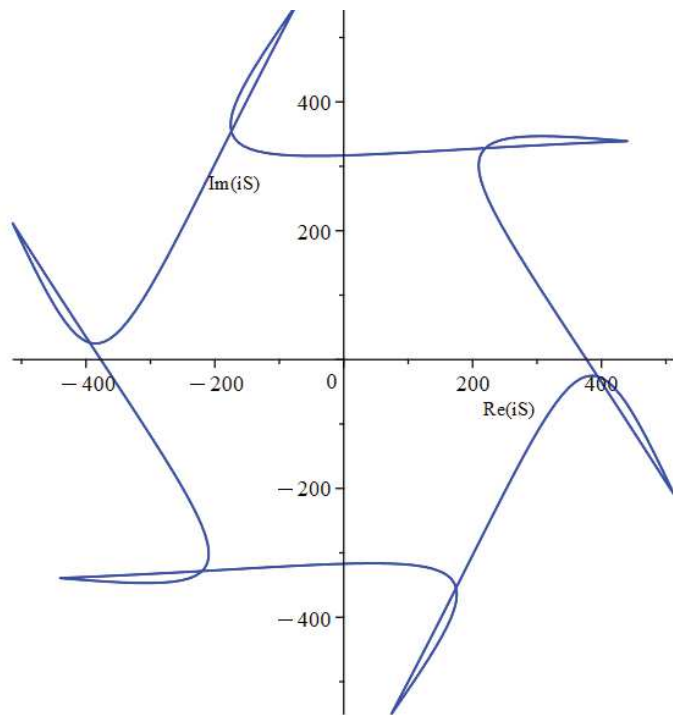
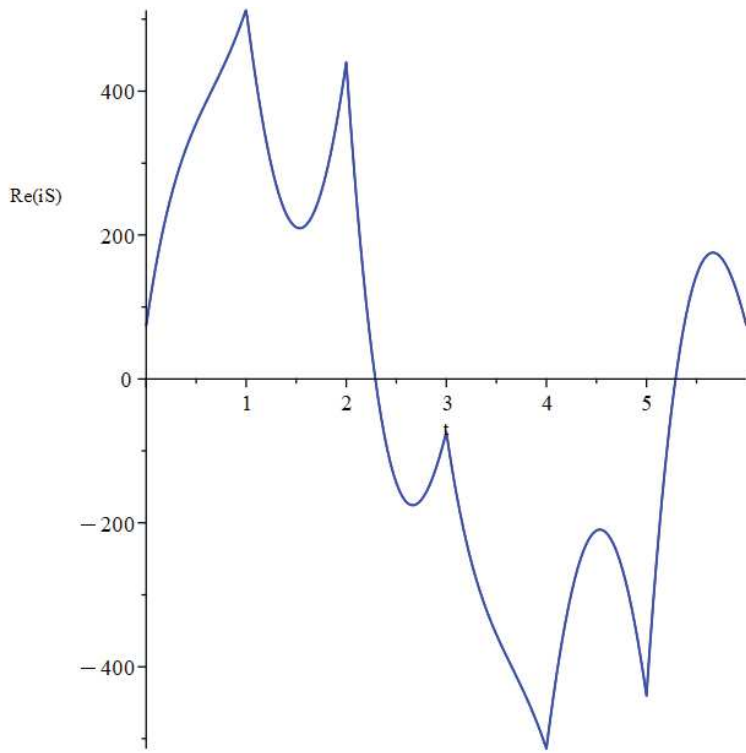


а)

б)

Рисунок 2.18 – Потокосцеплення статора, Вб:

а) годограф; б) зміна абсолютного значення



а)

б)

Рисунок 2.19 – Струм статора, А: а) годограф вектору, б) струм фази «а»)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

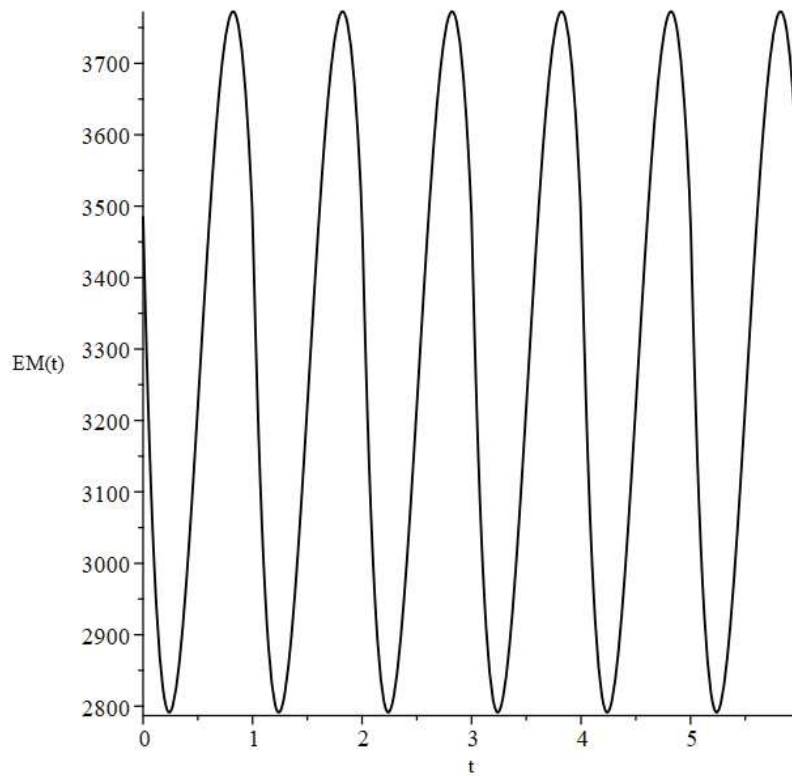


Рисунок 2.20 – Електромагнітний момент, Нм

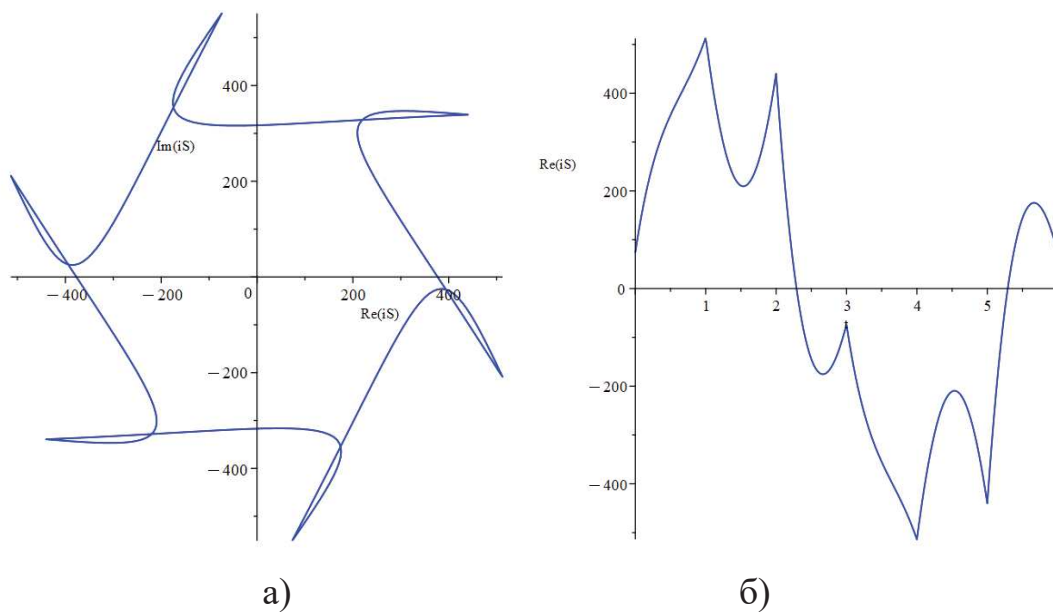


Рисунок 2.21 – Струм ротора, А: а) годограф вектора iR , б) - Струм фази «а»
 В якості зауваження потрібно наголосити, що при живленні АТ від мережі з напругою синусоїдальним рокографи векторів представляють кола, а відповідні фазні величини - синусоїди.

Рисунок 2.22 демонструє режим електромагнітного гальма (генераторний режим). В цьому режимі енергія гальмування розсіюється в гальмівних резисторах або повертається в енергосистему живлення.

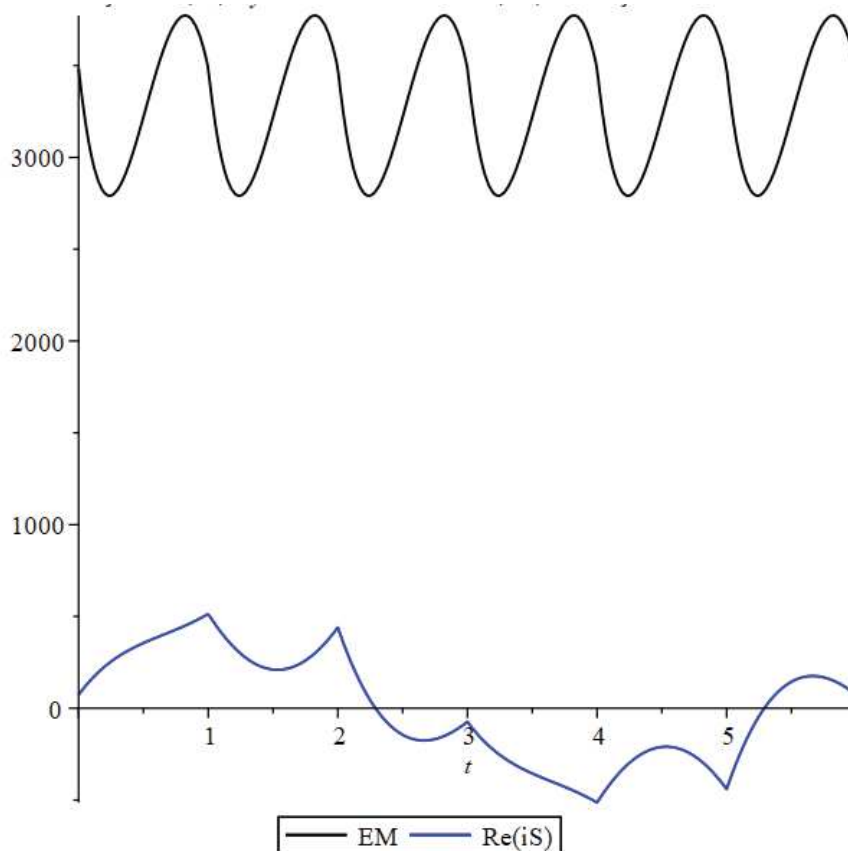
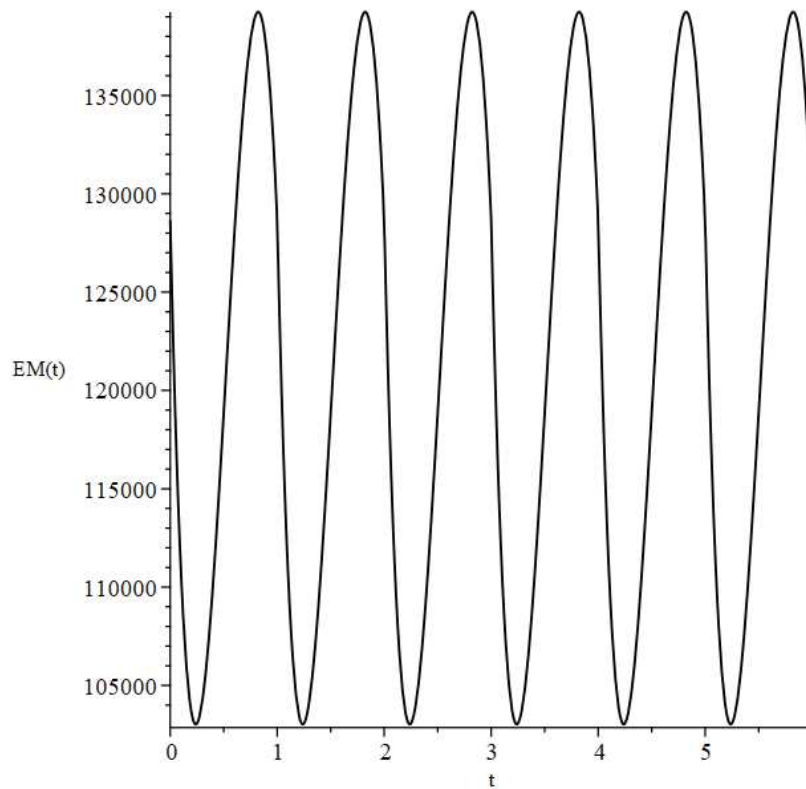
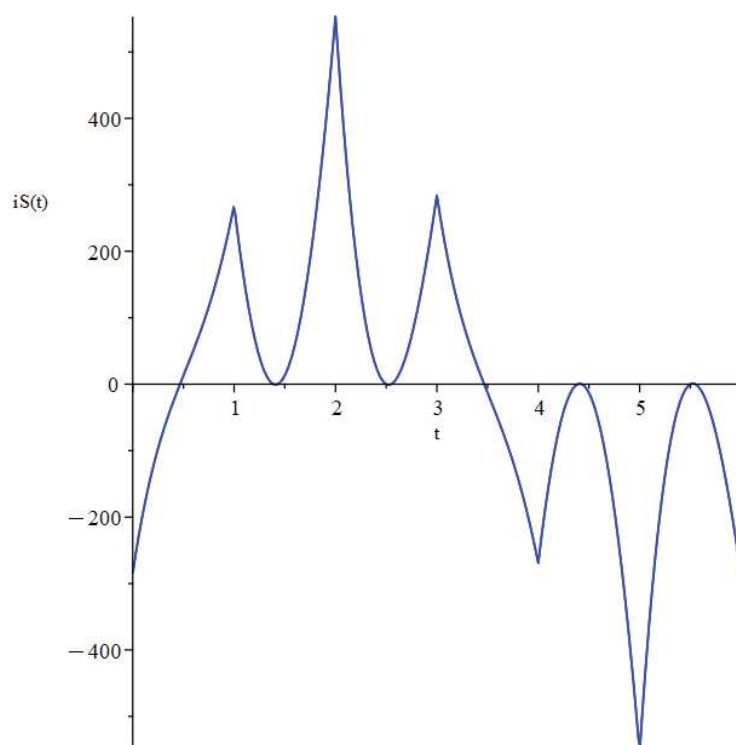


Рисунок 2.22 – Фазний струм та електромагнітний момент АТД у режимі генераторного гальма

У режимі ідеального холостого ходу частота ковзання АТД дорівнює нулю. Цей режим не є робочим і використовується як проміжний між робочими режимами тяги та гальмування. Криві електромагнітного моменту й фазного струму холостого ходу наведені на рис.2.23. Як видно з рис.2.23,а, середнє значення моменту в цьому режимі дорівнює нулю.



а)



б)

Рисунок 2.23 – Холостий перебіг АТД:

а) електромагнітний момент, E_M , Нм; б) фазний струм, $Re(i_S)$, А

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

38

2.4 Широтно-імпульсне регулювання напруги АТД – ШІР

Найпростішим методом зміни величини напруги, яка підводиться до АТД, є його прямокутно-імпульсна модуляція з частотою, кратною шостій частині періоду вихідної напруги. Крива фазної напруги для цього варіанту показана на рисунку 2.24.

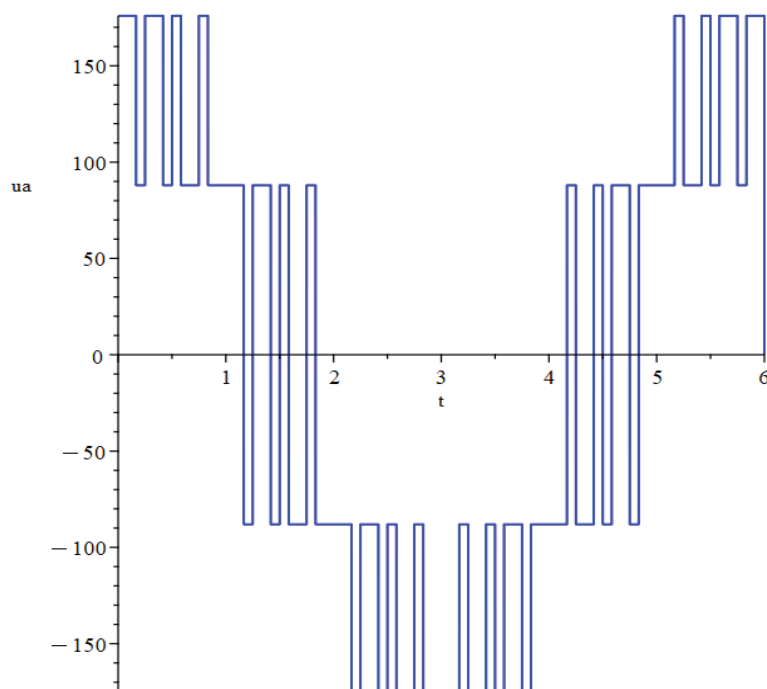


Рисунок 2.24 – Фазна напруга $u(t)$ АТД при живленні від АІН - ШІР з параметрами управління $K = 3$, $\gamma = 0.5$, $u_d = 360$ В (прямокутна модуляція)

При розрахунку ухвалено такі позначення: - період комутації з фази на фазу (базова одиниця часу), с; T - період комутації за тактовою частотою, с; $n = 0, 1, 2 \dots$ - теперішній номер міжкомутаційного інтервалу за головною частотою; $K = \tau/T$; k - теперішній номер періоду комутації тактовою частотою всередині інтервалу τ , $k = 0, 1 \dots K-1$; t - поточний час; γ - відношення тривалості імпульсу доданої до двигуна напруги до періоду тактової частоти (коефіцієнт регулювання напруги).

В даному разі рівняння (2.5) розв'язується для двох випадків – для імпульсу (з правою частиною) і для паузи, коли прикладена напруга дорівнює нулю.

Загальний вигляд цих рішень для імпульсу (індекс «*i*») та паузи (індекс «*p*») відповідно

$$\psi_{2,i}(t) = \frac{au_n}{a_2} + A1_{n,k}e^{p_1(t-n-\frac{k}{K})} + A2_{n,k}e^{p_2(t-n-\frac{k}{K})}, \quad (2.26)$$

$$\psi_{2,p}(t) = B1_{n,k}e^{p_1(t-n-\frac{k+\gamma}{K})} + B2_{n,k}e^{p_2(t-n-\frac{k+\gamma}{K})} \quad (2.27)$$

де $A1_{n,k}$, $B1_{n,k}$, $A2_{n,k}$, $B2_{n,k}$ – Сталі коефіцієнти, що залежать від порядкових номерів n та k . Ці коефіцієнти визначаються з граничних умов у два етапи. Прирівнюючи потікозчеплення ротора та його похідну «зліва» і «справа» від граничної точки (точки комутації), дістаємо різницеві рівняння для визначення сталих коефіцієнтів спочатку для k та $(k+1)$ періодів тактової частоти, вважаючи $n=const$, потім для n та $(n+1)$ періодів комутації по робот. Отримані у такий спосіб різницеві рівняння розв'язані методом D -перетворення. Нижче наведено вирази Марле для цих коефіцієнтів, які після їх підстановки (26) та (27) дали змогу розрахувати залежність потікозчеплення ротора від часу.

$$A1_{n,k} := A1_{0,0} e^{(1/3 I \pi n)} \left(\frac{e^{\left(\frac{p_1 k}{K}\right)} \left(\frac{e^{p_1} - e^{\left(\frac{p_1}{K}\right)} + e^{\left(\frac{p_1(1-\gamma)}{K}\right)} - e^{\left(\frac{p_1(K+1-\gamma)}{K}\right)} \right) - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}{1 - e^{\left(\frac{p_1}{K}\right)}} \right) \left(\frac{e^{p_1} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}{e^{\left(\frac{p_1}{K}\right)}} \right) - \frac{\left(e^{\left(\frac{p_1(1-\gamma)}{K}\right)} - 1 \right) \left(1 - e^{\left(\frac{p_1 k}{K}\right)} \right)}{1 - e^{\left(\frac{p_1}{K}\right)}} \right), \quad (2.28)$$

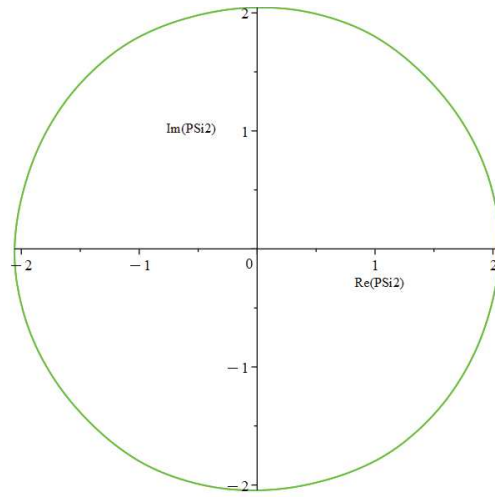
$$A2_{n,k} := A2_{0,0} e^{(1/3 I \pi n)} \left(\frac{e^{\left(\frac{p_2 k}{K}\right)} \left(\frac{e^{p_2} - e^{\left(\frac{p_2}{K}\right)} + e^{\left(\frac{p_2(1-\gamma)}{K}\right)} - e^{\left(\frac{p_2(K+1-\gamma)}{K}\right)} \right) - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} I \sqrt{3}}{1 - e^{\left(\frac{p_2}{K}\right)}} \right) - \frac{\left(e^{\left(\frac{p_2(1-\gamma)}{K}\right)} - 1 \right) \left(1 - e^{\left(\frac{p_2 k}{K}\right)} \right)}{1 - e^{\left(\frac{p_2}{K}\right)}} \right) \cdot \quad (2.29)$$

Вираження коефіцієнтів $B1$, $B2$ подібні, причому величина коефіцієнтів на нульових відрізках дорівнює:

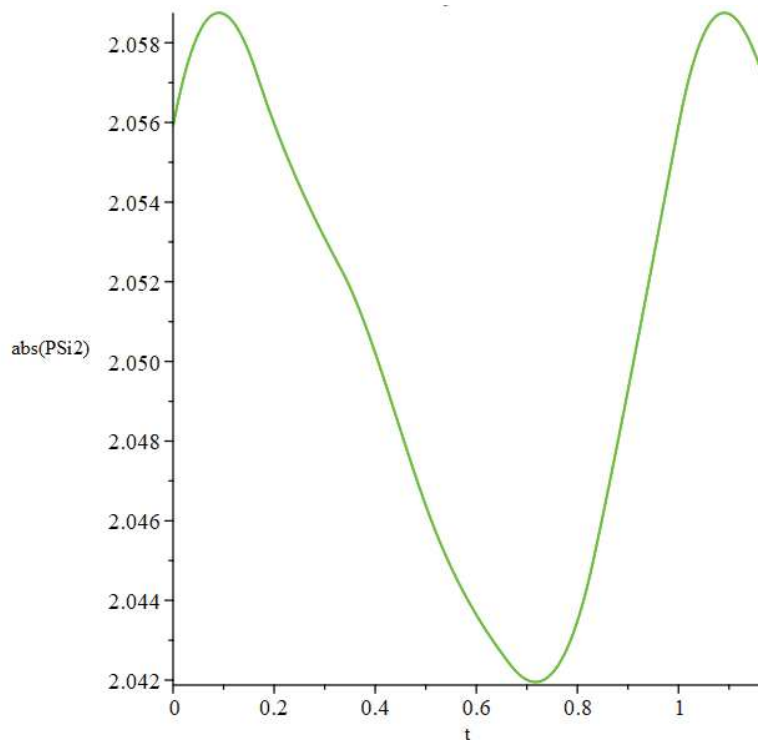
$$A1_{0,0} = B1_{0,0} = A_0; \quad A2_{0,0} = B2_{0,0} = B_0.$$

Розрахунок виконано за таких значень сталих величин: $\gamma = 0.5$; $u_d = 360$; $K = 3$; $k = 0, 1, 2$ на кожному періоді комутації з фази на фазу.

Корені p_1 , p_2 залишилися колишніми. Розв'язується процес, що встановився, протягом одного цілого періоду електричних величин, в межах $t = 0 \dots 6$, $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$. Обчислення струмів та електромагнітного моменту виконано за формулами, отриманими в послідовності, зазначеній у попередньому прикладі. Зміна фазної напруги АТД у функції часу прийнятого режиму роботи продемонстровано на рис. 2.24. На рис. 2.25 наведено отримані таким чином годограф потокозчеплення ротора (а) та зміна в часі його амплітуди (б), на рис. 2.26 наведено те ж саме для статора струму. На рис. 2.27 наведено результати обчислення електромагнітного моменту.



а)



б)

Рисунок 2.25 – Потокосцеплення Ψ_2 [Вб] ротора АТД при живленні від АІН – ШІР ($\gamma = 0.5$, $K = 3$, $u_d = 360$ В):

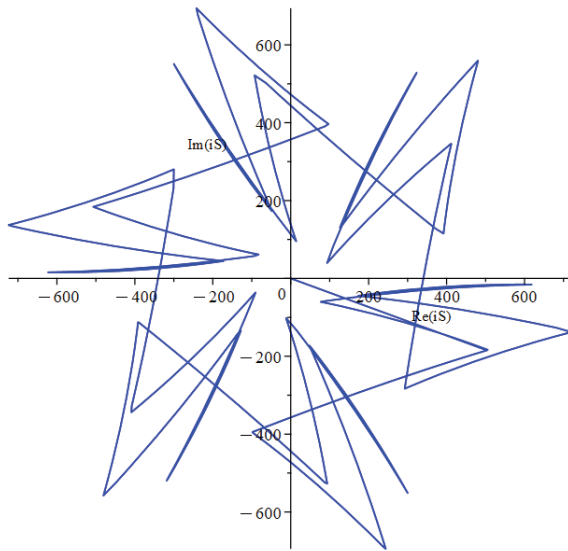
а) годограф вектору Ψ_2 ; б) пульсація модуля $|\Psi_2|$.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

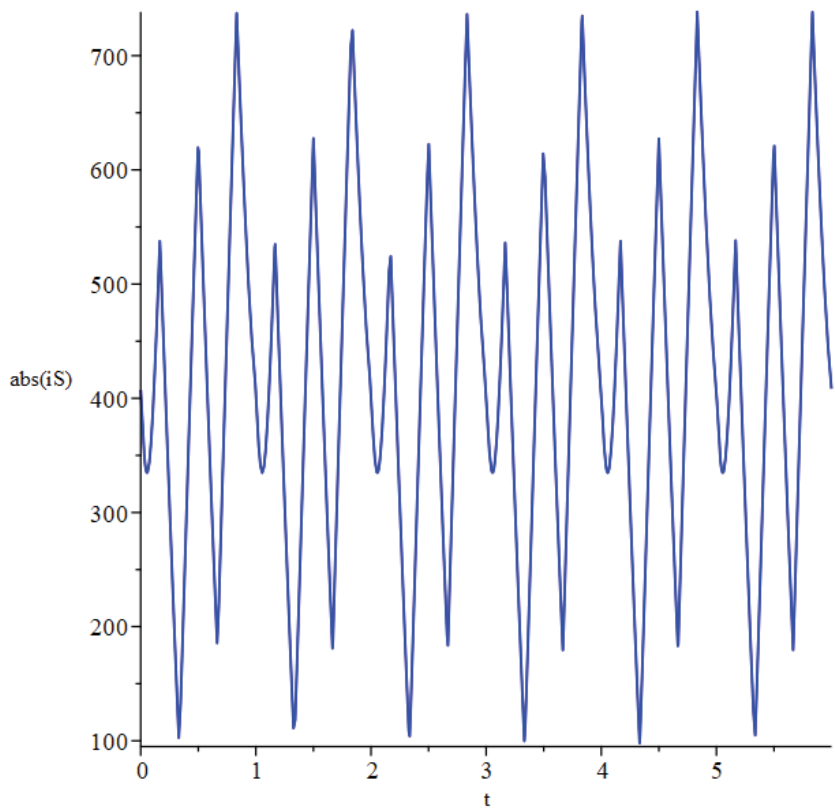
БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

42



а)



б)

Рисунок 2.26 – Струм статора i_1 (А) АТД при живленні від АІН -ШІР ($\gamma = 0.5$, $K = 3$, $u_d = 360$ В):

а) годограф вектору i_1 ; б) пульсація модуля $|i_1|$.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

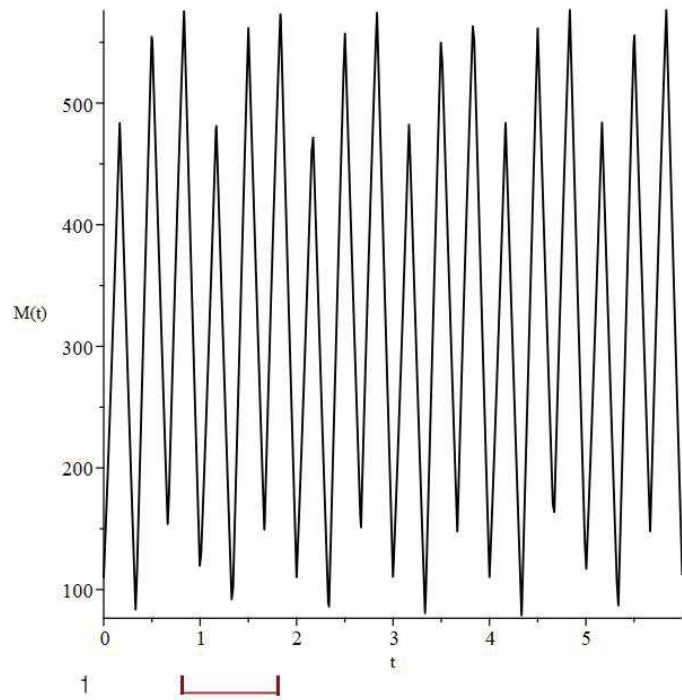


Рисунок 2.27 – Пульсації електромагнітного моменту M [Нм] при живленні АТД від АІН – ШІР ($\gamma = 0.5$, $K = 3$, $u_d = 350$ В).

Схема Моделі PWM інвертора показана на рис.2.28

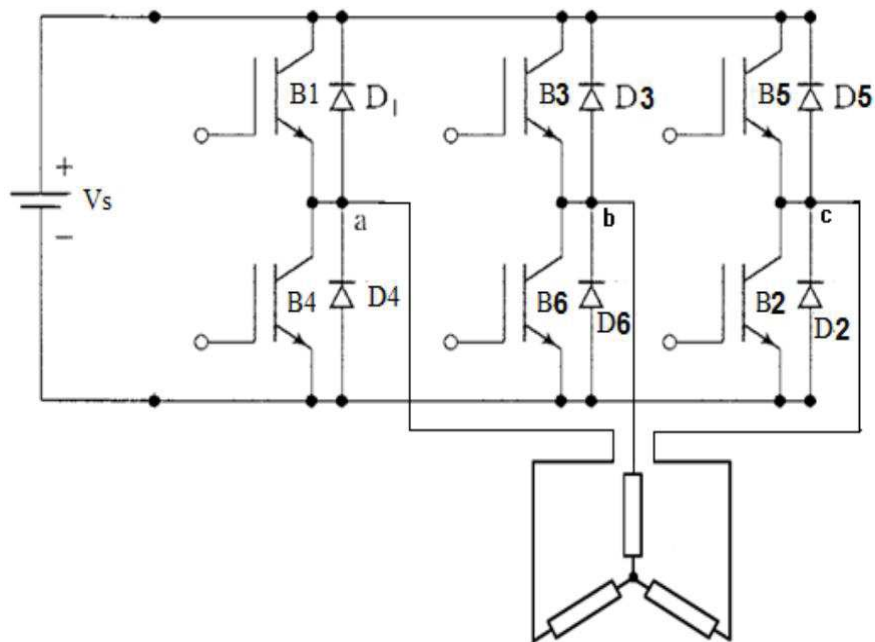


Рисунок 2.8 –Моделі PWM інвертора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

44

2.5 Висновки до другого розділу

Розроблено методику проєктування асинхронного тягового приводу, засновану на працях [11–21], що використовує як початкові (задані) дані геометрію осердя статора і бере до уваги електромеханічні характеристики як один із критеріїв ефективності двигуна.

Проведені відповідні розрахунки.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ТЯГОВОМУ ДВИГУНІ

3.1 Номінальний режим

На рисунку 3.1 продемонстровані криві фазної напруги для поліпшеного алгоритму («Siebenfachtaktung» - так цей алгоритм названо в технічній літературі) порівняно з звичайним шестипульсовим алгоритмом 180 ел. градусів.

На рис.3.2 подано залежність фази вектора напруги від часу для алгоритмів поліпшеного та звичайного. Час t дано в о. е.

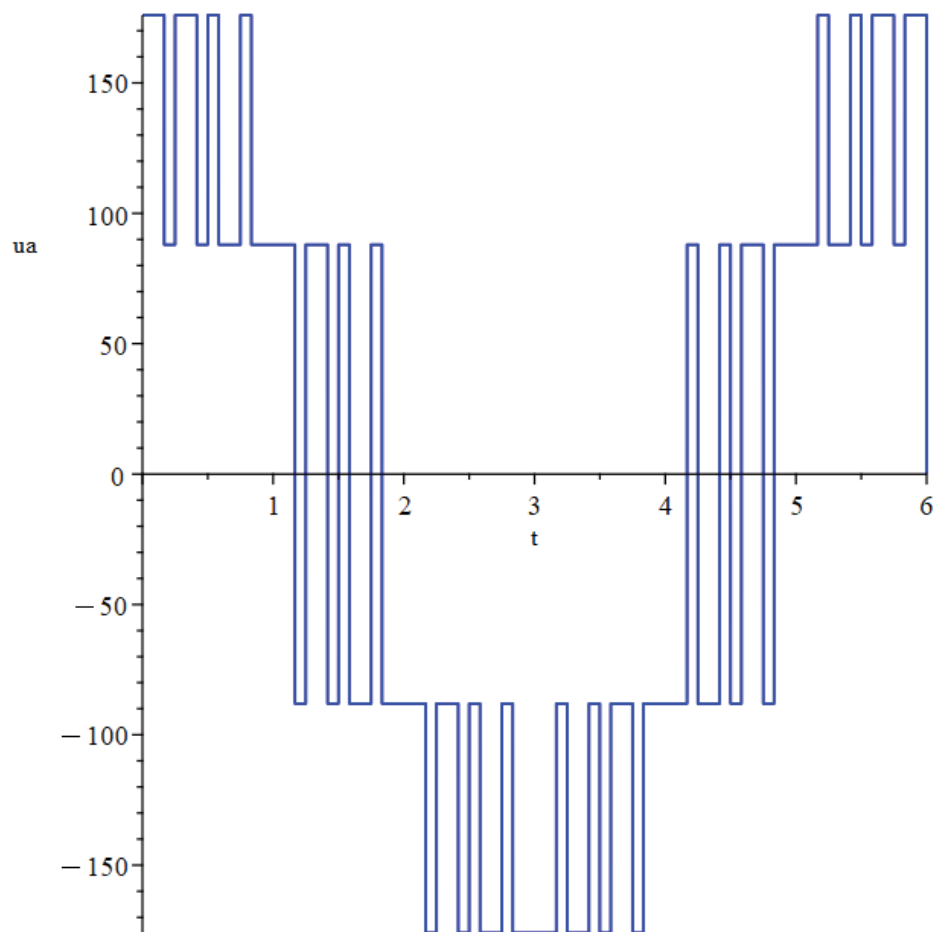


Рисунок 3.1 – Напруга фази, В

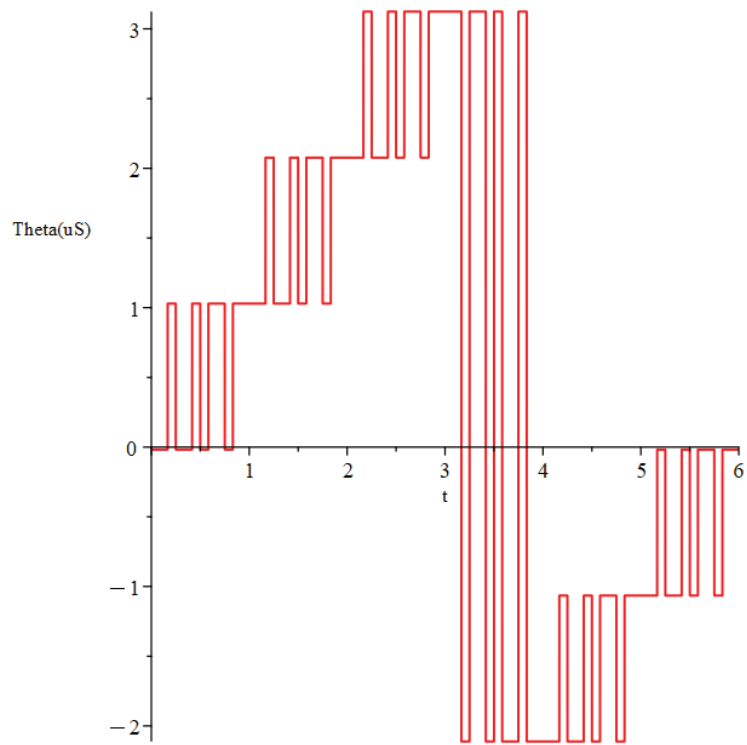


Рисунок 3.2 – Зміна часу фази (ел. рад.) вектора напруги для алгоритму керування

По кривій рис.3.2 видно, що з новому алгоритмі вектор напруги сім разів змінює фазу протягом кожної шостої частини періоду.

На рисунку 3.3 показані годографи векторів, а на рис. 3.4 – криві фазних струмів для аналізованих алгоритмів за формулою 3.1.

$$iS := \begin{cases} 240\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{I}{2} \right) & 0 \leq t < 1 \\ 240I\sqrt{3} & 1 \leq t < 2 \\ 240\sqrt{3} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{I}{2} \right) & 2 \leq t < 3 \\ 240\sqrt{3} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{I}{2} \right) & 3 \leq t < 4 \\ -240I\sqrt{3} & 4 \leq t < 5 \\ 240\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{I}{2} \right) & 5 \leq t < 6 \\ 240\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{I}{2} \right) & 6 \leq t < 7 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.1)$$

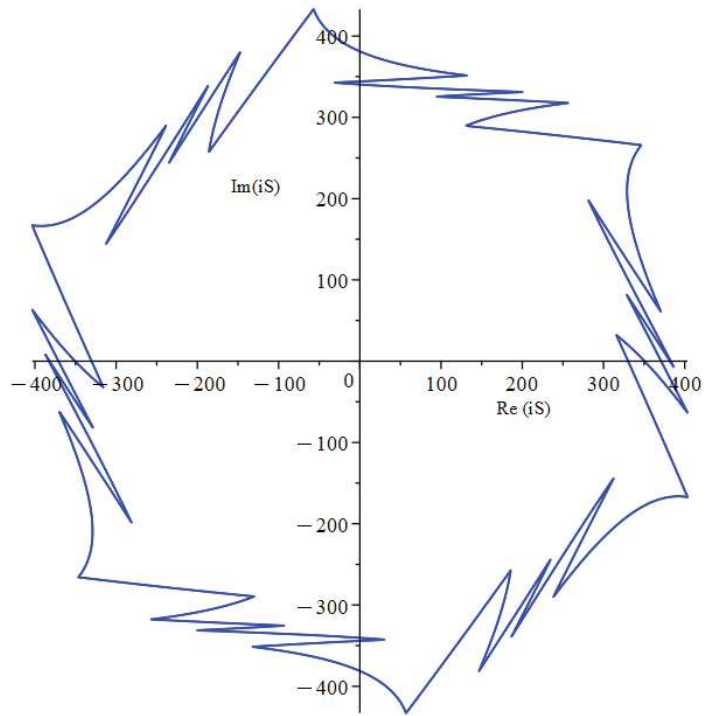
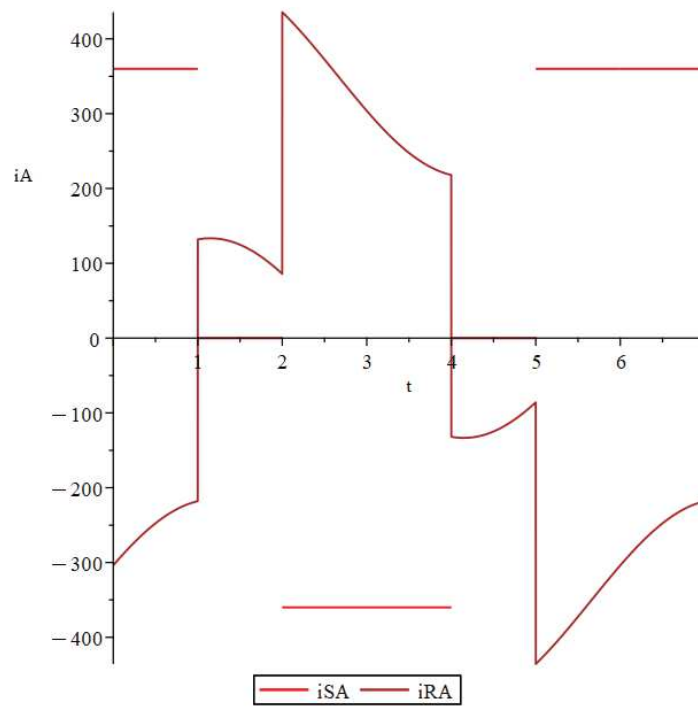


Рисунок 3.3 – Годограф вектору струму статора, A для алгоритму керування



а)

б)

Рисунок 3.4 – Криві фазних струмів двигуна, A для алгоритму керування

Криві зміни вхідного струму інвертора (ud) з часом д показані на рис.3.5.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

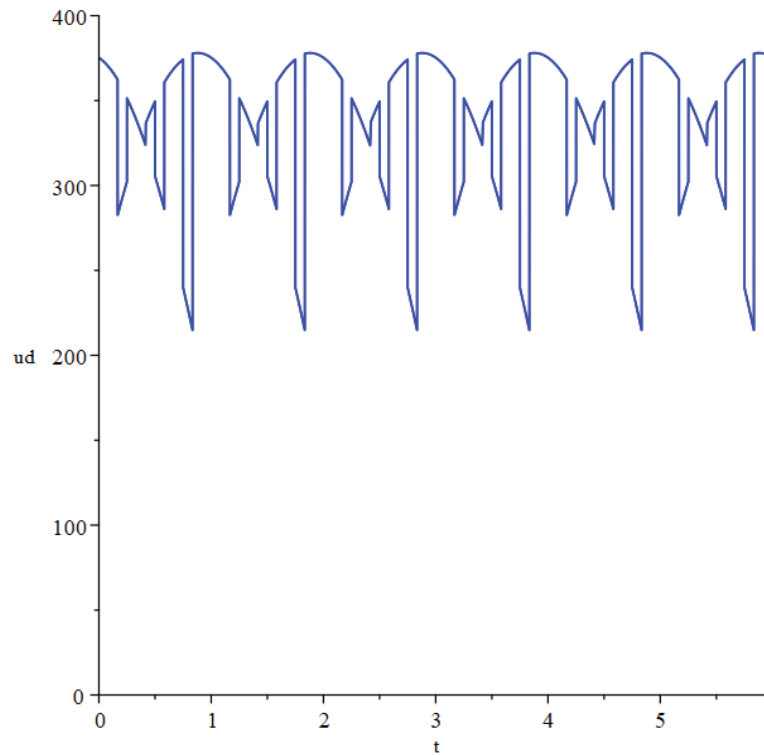


Рисунок 3.5 – Вхідний струм інвертора, А для алгоритму керування

Показні процес у машині для номінального режиму. Як видно з рисунка 3.6 (годограф вектора потокозчеплення статора) і рис.3.7 (криві електромагнітного моменту).

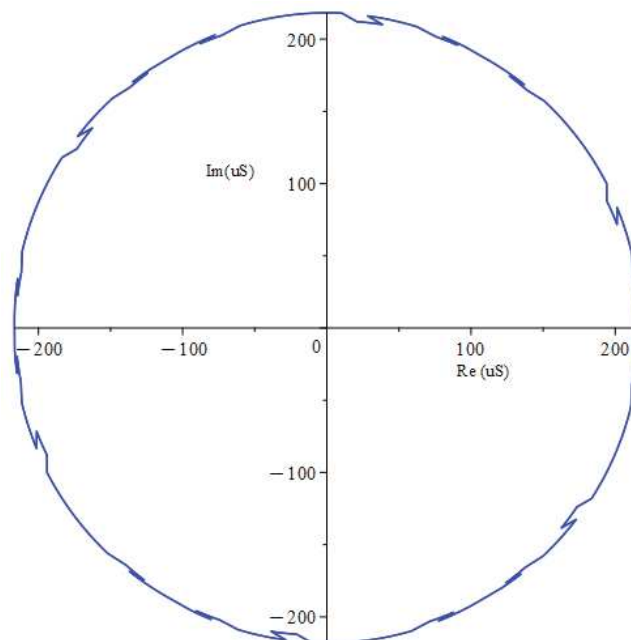


Рисунок 3.6 – Годограф векторів потокозчеплення статора, Вб, для алгоритму керування

Гармонічний аналіз кривих показав зменшення 5-ї та 7-ї гармонійних складових фазного струму для номінального режиму (див. нижче).

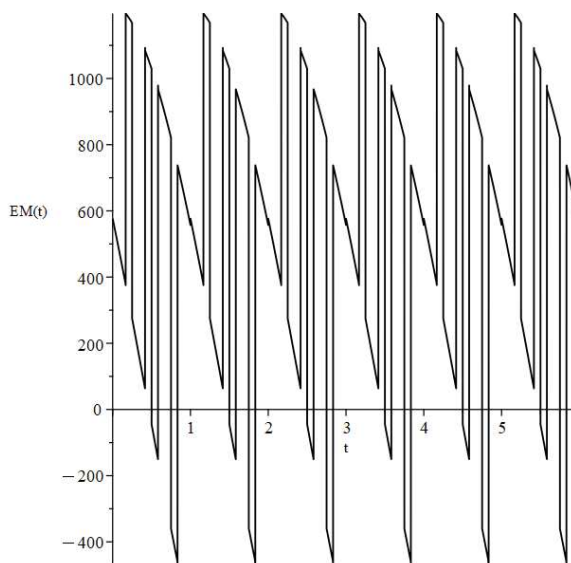


Рисунок 3.7 – Залежність електромагнітного моменту АТД (Нм) від часу в номінальному режимі для алгоритму керування

Щоб можна було зробити конкретні висновки щодо застосування у тяговому асинхронному приводі нового алгоритму керування, розрахунки виконані і для інших типових режимів.

3.2 Холостий хід двигуна (вибіг)

Відомо, що при живленні від АІН відносний вміст вищих гармонійних струму двигуна збільшується зі зменшенням частоти ковзання, при нульовому ковзанні він максимально покращується. ($f_2 = 0$).

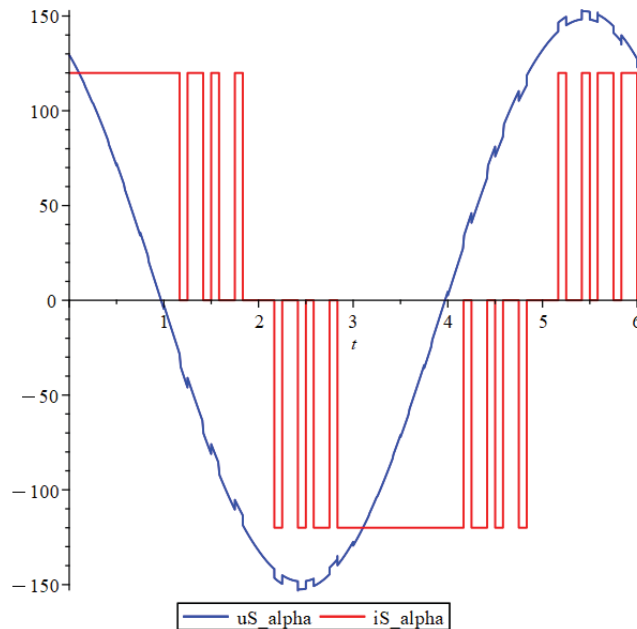


Рис. 3.8 - Фазний струм, А, асинхронного тягового двигуна в режимі ідеального холостого ходу.

Вхідний струм інвертора в цьому режимі показано на рисунку 3.9.
 На рисунку 3.10 наведено зміну в часі електромагнітного моменту.

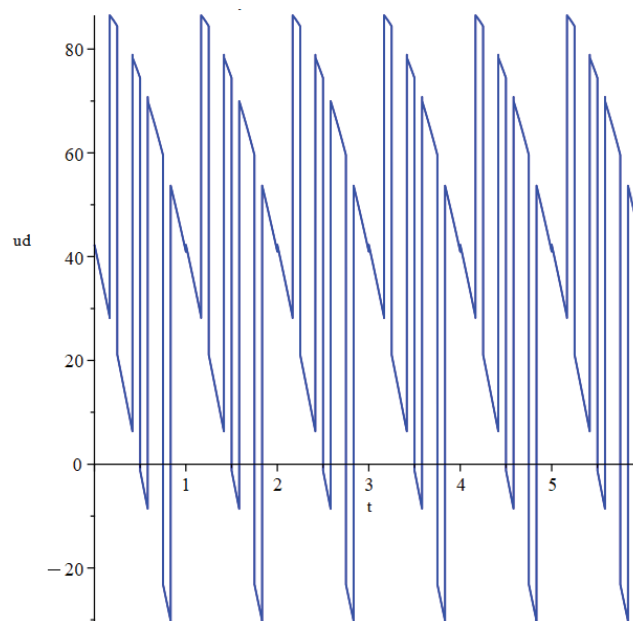


Рисунок 3.9 – Вхідний струм інвертора при відповідному алгоритмі керування в режимі ідеального холостого ходу асинхронного двигуна

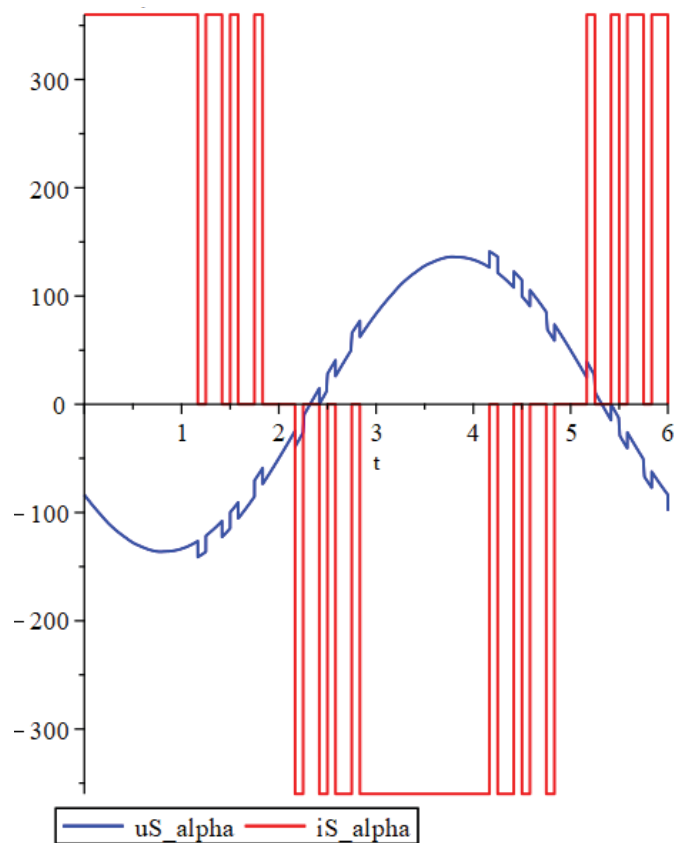


Рисунок 3.10 – Пульсації електромагнітного моменту, Нм, на холостому ході асинхронної машини для даного алгоритму керування інвертором

Фактично режим ідеального холостого ходу можна застосовувати при вибігу перед повторним включенням у режим тяги або гальмування, при цьому виключається втрата часу на збудження асинхронної машини.

3.3 Гальмівний (генераторний) режим

Параметри генераторного режиму близькі до сталих значень за винятком частоти ковзання: $f_2 = -0.53$ Гц. Для цього режиму показані криві фазних струмів і електромагнітного моменту на рисунках 3.11 і 3.12.

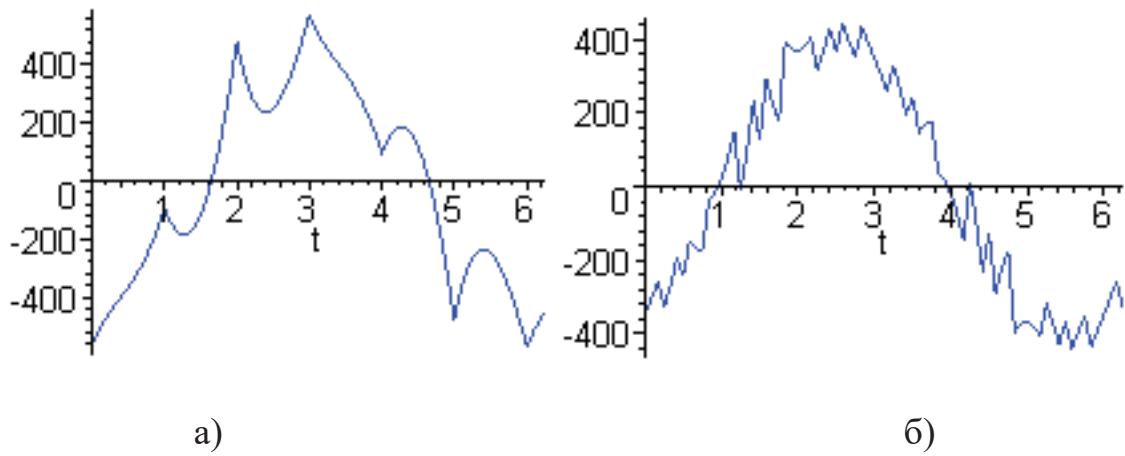


Рисунок 3.11 – Фазний струм, А, асинхронного тягового двигуна в гальмівному режимі

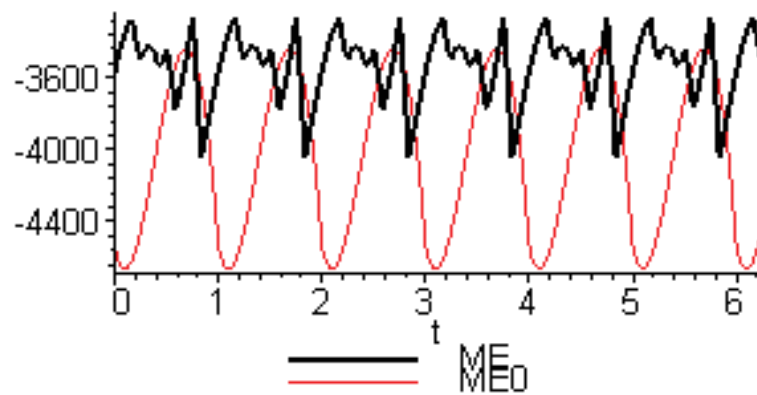


Рисунок 3.12 – Електромагнітний момент (Нм) асинхронної машини в гальмівному стані для алгоритм укерування інвертором

За властивостями ці криві (коефіцієнт спотворення, величина пульсацій моменту) мало відрізняються від кривих в номінальному руховому стані.

3.4 Стан запуску

У таблиці 3.1 наведено параметри стану запуску (початку руху). На рисунках 3.13–3.14 наведено електромагнітні процеси у тяговому приводі в режимі запуску

Таблиця 3.1 - Параметри АД для розрахунку стану запуску

P_2 , кВт	u_d , В	i_d , А	M_e , Нм	f_1 , Гц	f_2 , Гц	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , Г	L_2 , Г	L_{12} , Г
-	27	Рис.3.17	Рис.3.18	0.53	0.53	0.0228	0.0193	0.01568	0.01574	0.0153

Слід зауважити, що в існуючих тягових асинхронних приводах у «чотирихквadrантних» схемах перетворювачів забезпечується в режимі запуску та розгону краща якість показаних на цих рисунках кривих за рахунок високочастотної модуляції. Розрахункові формули представлені нижче:

$$\begin{aligned}
 A1 := (n, k) \mapsto e^{\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot n} \cdot & \left(\frac{e^{\frac{p1 \cdot k}{K}} \cdot \left(\frac{e^{p1} - e^{\frac{p1}{K}} + e^{\frac{p1 \cdot (1-\Gamma)}{K}} - e^{\frac{p1 \cdot (K+1-\Gamma)}{K}}}{1 - e^{\frac{p1}{K}}} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi} \right)}{e^{p1} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi}} - \frac{\left(e^{\frac{p1 \cdot (1-\Gamma)}{K}} - 1 \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{p1 \cdot k}{K}} \right)}{1 - e^{\frac{p1}{K}}} \right) \\
 A2 := (n, k) \mapsto e^{\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot n} \cdot & \left(\frac{e^{\frac{p2 \cdot k}{K}} \cdot \left(\frac{e^{p2} - e^{\frac{p2}{K}} + e^{\frac{p2 \cdot (1-\Gamma)}{K}} - e^{\frac{p2 \cdot (K+1-\Gamma)}{K}}}{1 - e^{\frac{p2}{K}}} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi} \right)}{e^{p2} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi}} - \frac{\left(e^{\frac{p2 \cdot (1-\Gamma)}{K}} - 1 \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{p2 \cdot k}{K}} \right)}{1 - e^{\frac{p2}{K}}} \right) \\
 B1 := (n, k) \mapsto e^{\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot n} \cdot & \left(\frac{e^{\frac{p1 \cdot (k+\Gamma)}{K}} \cdot \left(\frac{e^{p1} - e^{\frac{p1}{K}} + e^{\frac{p1 \cdot (1-\Gamma)}{K}} - e^{\frac{p1 \cdot (K+1-\Gamma)}{K}}}{1 - e^{\frac{p1}{K}}} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi} \right)}{e^{p1} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi}} - 1 - \frac{\left(e^{\frac{p1}{K}} - e^{\frac{p1 \cdot \Gamma}{K}} \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{p1 \cdot k}{K}} \right)}{1 - e^{\frac{p1}{K}}} \right) \\
 B2 := (n, k) \mapsto e^{\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot n} \cdot & \left(\frac{e^{\frac{p2 \cdot (k+\Gamma)}{K}} \cdot \left(\frac{e^{p2} - e^{\frac{p2}{K}} + e^{\frac{p2 \cdot (1-\Gamma)}{K}} - e^{\frac{p2 \cdot (K+1-\Gamma)}{K}}}{1 - e^{\frac{p2}{K}}} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi} \right)}{e^{p2} - e^{\frac{1}{3} \cdot \pi}} - 1 - \frac{\left(e^{\frac{p2}{K}} - e^{\frac{p2 \cdot \Gamma}{K}} \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{p2 \cdot k}{K}} \right)}{1 - e^{\frac{p2}{K}}} \right)
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

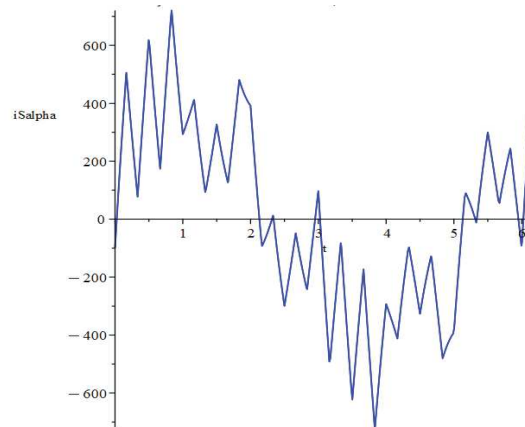


Рисунок 3.13 – Фазовий струм двигуна А в режимі запуску

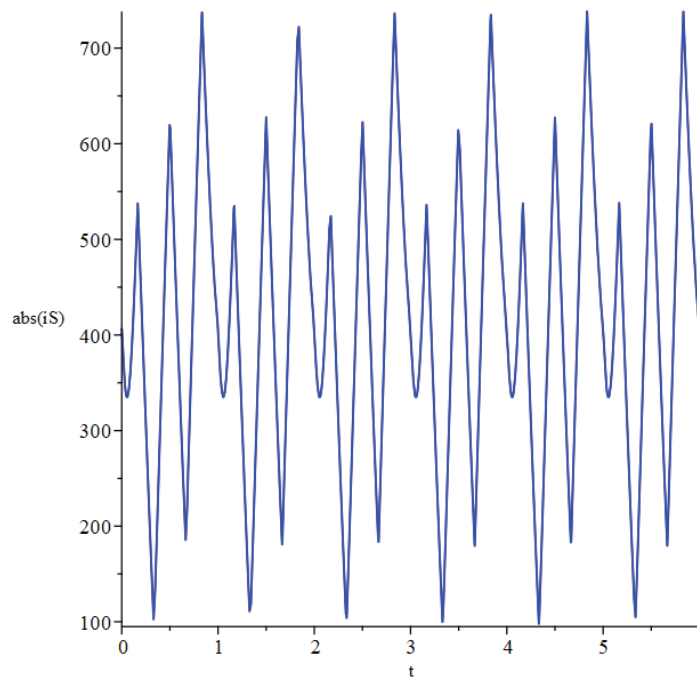


Рисунок 3.14 – Вхідний струм інвертора, А, в режимі запуску для алгоритму керування інвертором

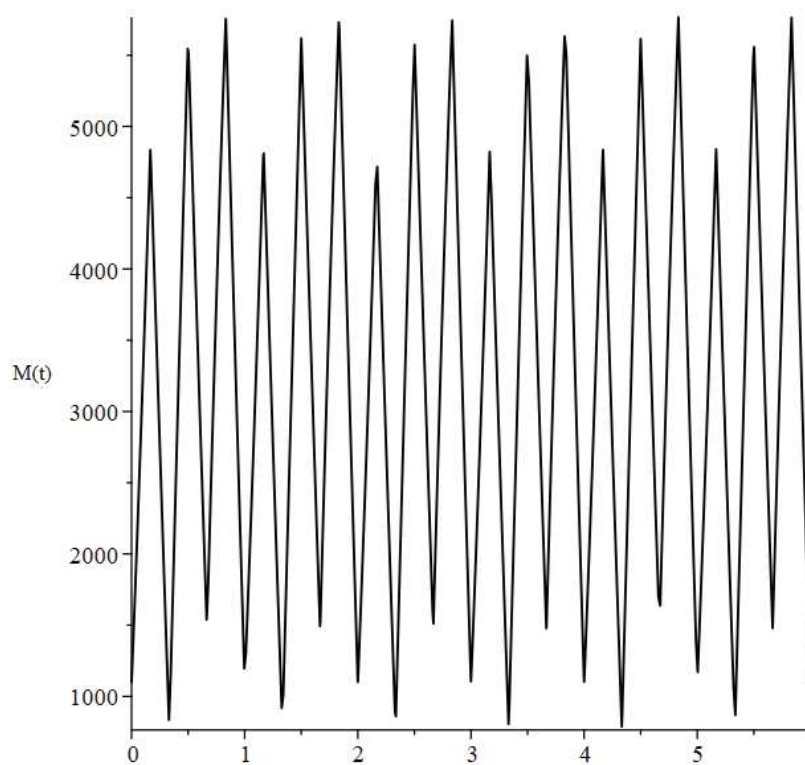


Рисунок 3.15 – Електромагнітний момент (Нм) асинхронного двигуна в режимі запуску для алгоритмів керування інвертором

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.5 Електромагнітні процеси в асинхронному тяговому двигуні під час живлення від інвертора струму без модуляції

Диференціальне рівняння залежності потокозчеплення ротора від часу при живленні АТД від АІТ має вигляд:

$$\left(\frac{d}{dt}\psi_2(t)\right) + \frac{\tau(R_2 - \omega L_2 I)}{L_2}\psi_2 = \frac{\tau R_2 L_{12} i_1}{L_2}; \quad (3.3)$$

його рішення у вигляді:

$$\psi_2(t) := \frac{R_2 L_{12} i_{1,n}}{R_2 - \omega L_2 I} + C_n e^{p(t-n)}, \quad (3.4)$$

де $i_1 \equiv i_{1,n}$ – узагальнений вектор струму статора, постійний на кожному міжкомутаційному інтервалі:

$$i_{1,n} := \frac{2}{3}\sqrt{3} i_d e^{(1/3 I \pi n + 1/6 I \pi)}; \quad (3.5)$$

p – корень характеристичного рівняння,

$$p := -\frac{\tau(R_2 - \omega L_2 I)}{L_2}, \quad (3.6)$$

C_n – постійний коефіцієнт, порядок визначення якого зазначено вище. Загальний вид висловлювання для цього коефіцієнта:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$C_n := C_0 \left(e^{(pn)} + \frac{(e^{(1/3 I \pi n)} - e^{(pn)}) \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3} \right)}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3} - e^p} \right), \quad (3.7)$$

а для встановленого режиму при $e^{pn} = 0$,

$$C_n := \frac{C_0 e^{(1/3 I \pi n)} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3} \right)}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} I \sqrt{3} - e^p}; \quad (3.8)$$

C_0 – значення цього коефіцієнта на нульовому інтервалі

$$C_0 := \frac{2}{3} \frac{i_d R_2 L_{12} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} I \right) \sqrt{3}}{R_2 - \omega L_2 I}. \quad (3.9)$$

Приклади обчислення електромагнітних процесів для різних режимів АТД наведені нижче.

3.5.1 Номінальний тяговий режим

Результати розрахунку потокозчеплення ротора наведено рисунку 3.17

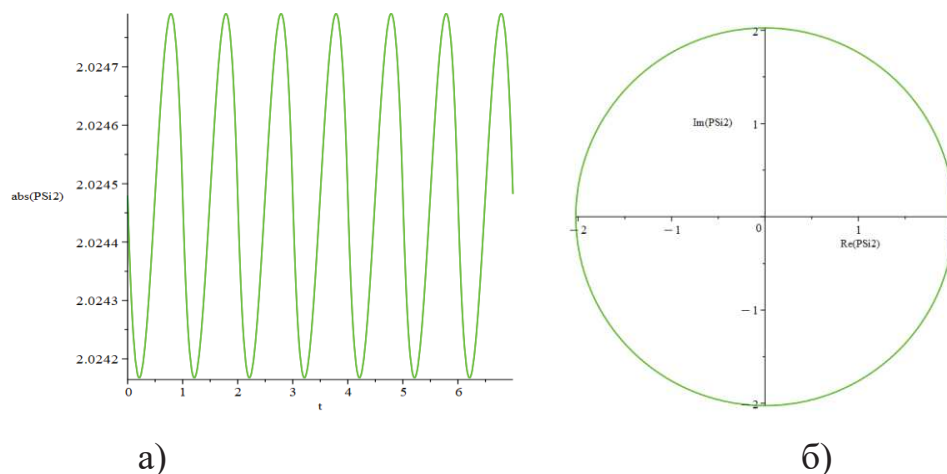


Рисунок 3.16 – Потокозчеплення Ψ_2 , Вб, ротора АТД при живленні від АІТ с амплітудним керуванням: а) годограф вектору Ψ_2 ; б) пульсація модуля $|\Psi_2|$

Оскільки струм статора заданий, шуканими величинами живлення АТД від АИТ може бути узагальнений вектор напруги, або вектор струму ротора. Ці вектори обчислюються за такими формулами:

$$u_S = R_1 i_S - \frac{L_{12} R_2 i_R}{L_2} + \frac{I L_{12} \omega \psi_2}{L_2}, \quad (3.10)$$

$$u_R = \frac{\psi_2 - L_{12} i_S}{L_2}. \quad (3.11)$$

На рисунку 3.17 наведено вектор напруги u_1 обмотки статора: а) годограф вектора; б) пульсація його модуля протягом періоду.

На рисунку 3.18 показано годограф струму ротора i_R і крива пульсації електромагнітного моменту $M(t)$, розрахована за формулою

$$M(t) = -\frac{mp}{2} I \psi_2 \text{conjugate}(i_R). \quad (3.12)$$

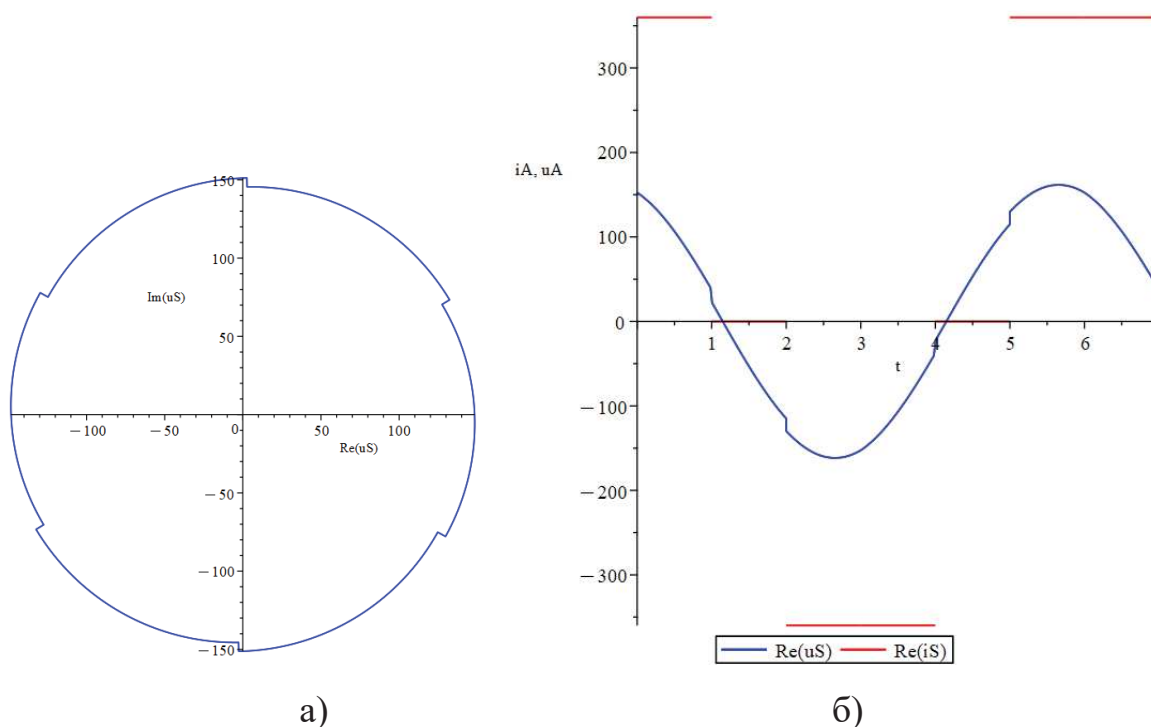
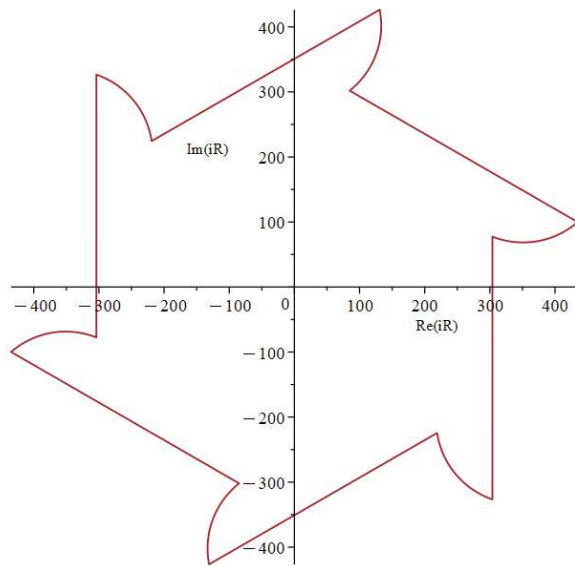
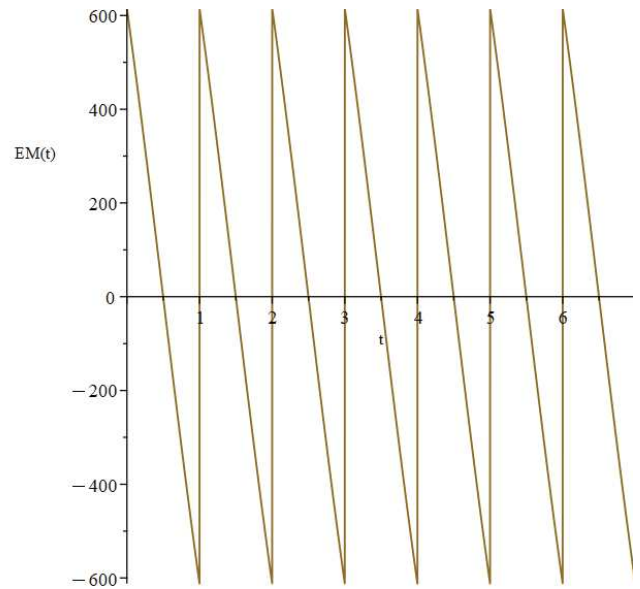


Рисунок 3.17 – Напруга u_S , В, обмотки статора АТД при живленні від АИТ з амплітудним керуванням: а) годограф вектора; б) пульсації амплітуди.



а)



б)

Рисунок 3.18 – Годограф струму ротора i_R , А (а) та електромагнітний момент $M(t)$, Нм, (б) АТД при живленні від АІТ з амплітудним керуванням

3.5.2 Режим генераторного гальмування

На рисунках 3.20–3.22 наведено результати розрахунку електромагнітних процесів у АТ при живленні від АІТ без модуляції струму в режимі гальмування генератора за формулою:

$$i_S := \begin{cases} 240\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} \right) & 0 \leq t < 1 \\ 240I\sqrt{3} & 1 \leq t < 2 \\ 240\sqrt{3} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} \right) & 2 \leq t < 3 \\ 240\sqrt{3} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} \right) & 3 \leq t < 4 \\ -240I\sqrt{3} & 4 \leq t < 5 \\ 240\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} \right) & 5 \leq t < 6 \\ 240\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} \right) & 6 \leq t < 7 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.13)$$

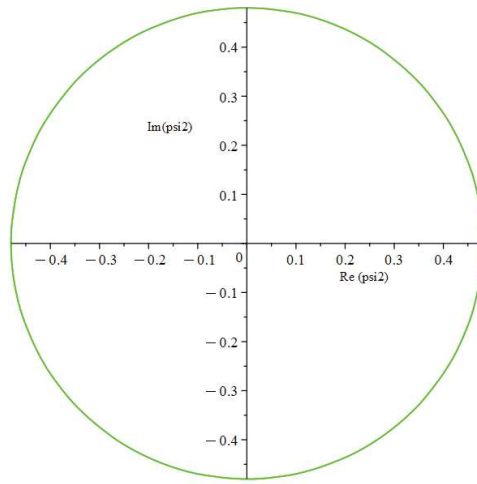


Рисунок 3.19 – Годограф потокозчеплення ротора, Вб, в гальмівному режимі

$$PSi2 := \frac{2R2M\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{I}{2} \right) id e^{\frac{I}{3}\pi n} \left(1 + \frac{\left(-\frac{1}{2} + \frac{I\sqrt{3}}{2} \right) e^{p(t-n)}}{e^p - \frac{1}{2} - \frac{I\sqrt{3}}{2}} \right)}{3(R2 - I\omega L2)} \quad (3.13)$$

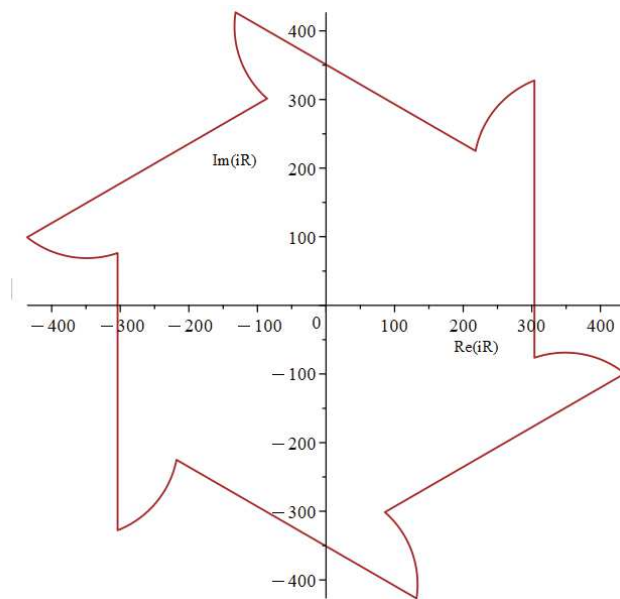


Рисунок 3.20 – Годограф струму ротора, А, в гальмівному режимі

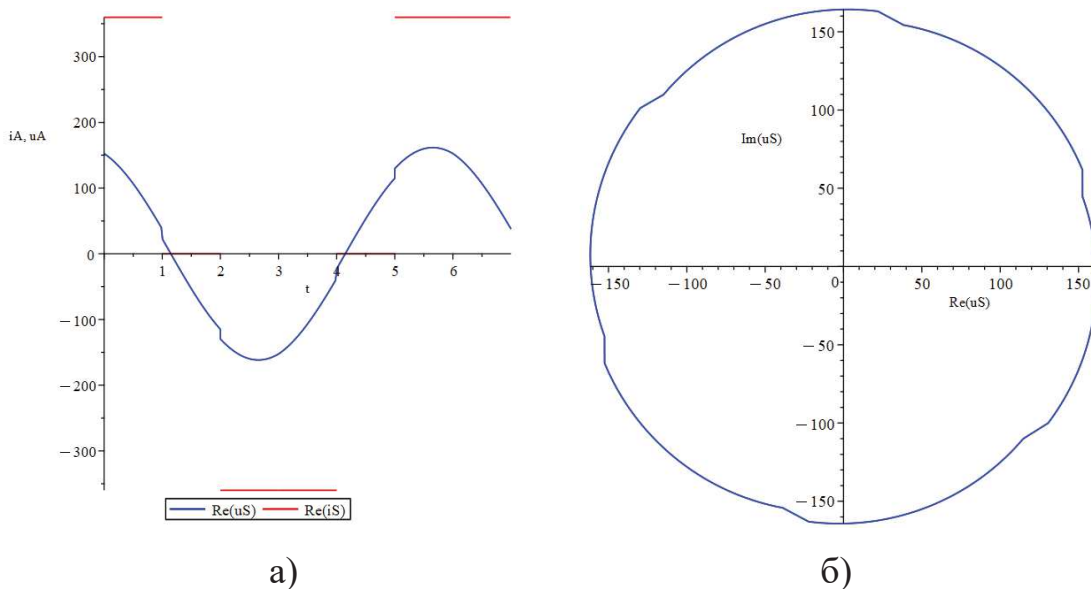


Рисунок 3.21 – Годограф напруги статора, В, (а) і «осцилограми» фазної напруги, В і струму, А, (б), асинхронного двигуна в режимі гальмування генератора

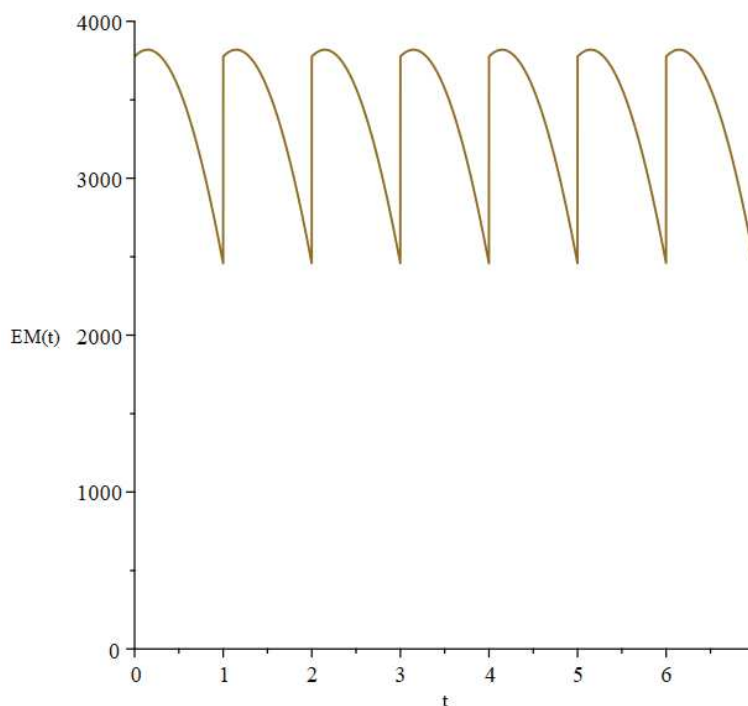
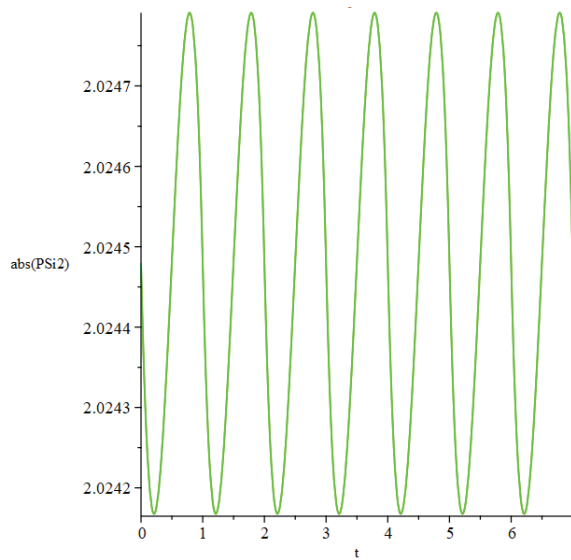


Рисунок 3.22 – Електромагнітний момент АТД, Нм, у режимі генераторного гальма

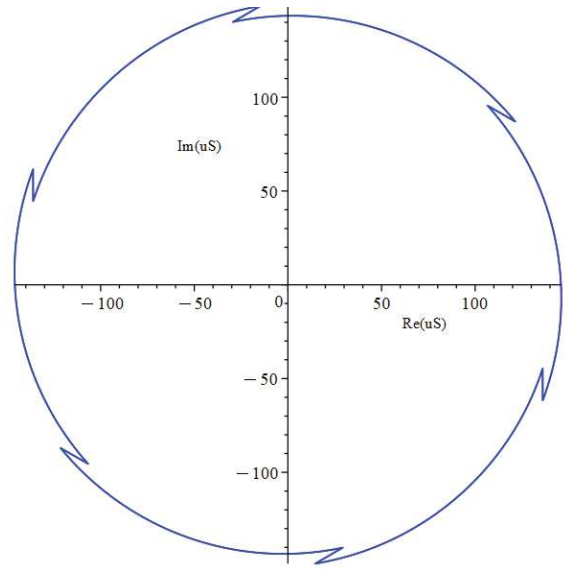
3.5.3 Режим ідеального холостого ходу

У цьому режимі (рис. 3.24-3.26) вихідна задана величина вхідного струму ід повинна бути знижена, щоб уникнути перевантаження магнітної системи АД.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

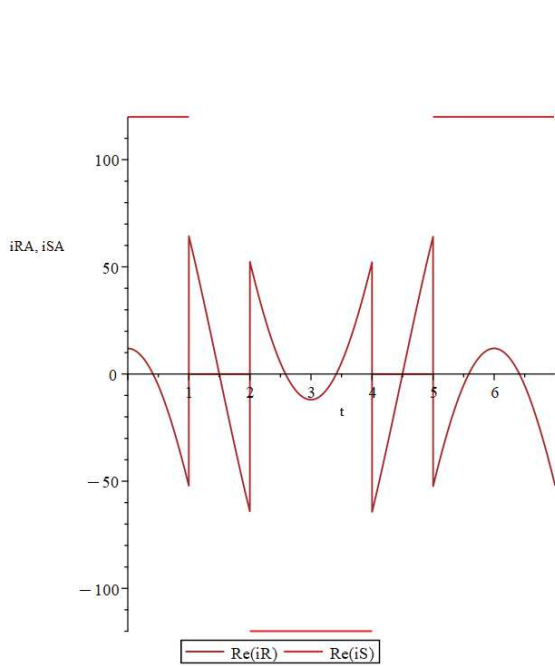


а)

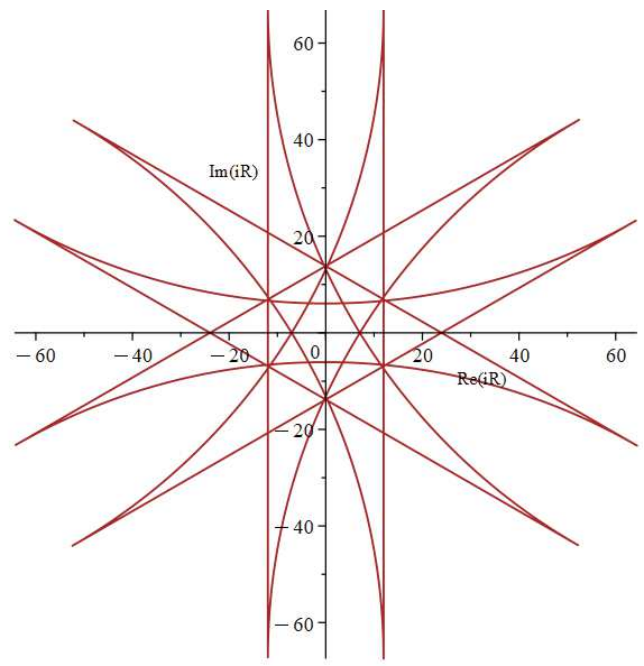


б)

Рисунок 3.23 – Потокосцеплення ротора на холостому ході АД, Вб: а) годограф; б) зміна амплітуди.



а)



б)

Рисунок 3.24 – Годограф струму ротора (а), та зміна фазних струмів ротора та статора, А, у часі (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

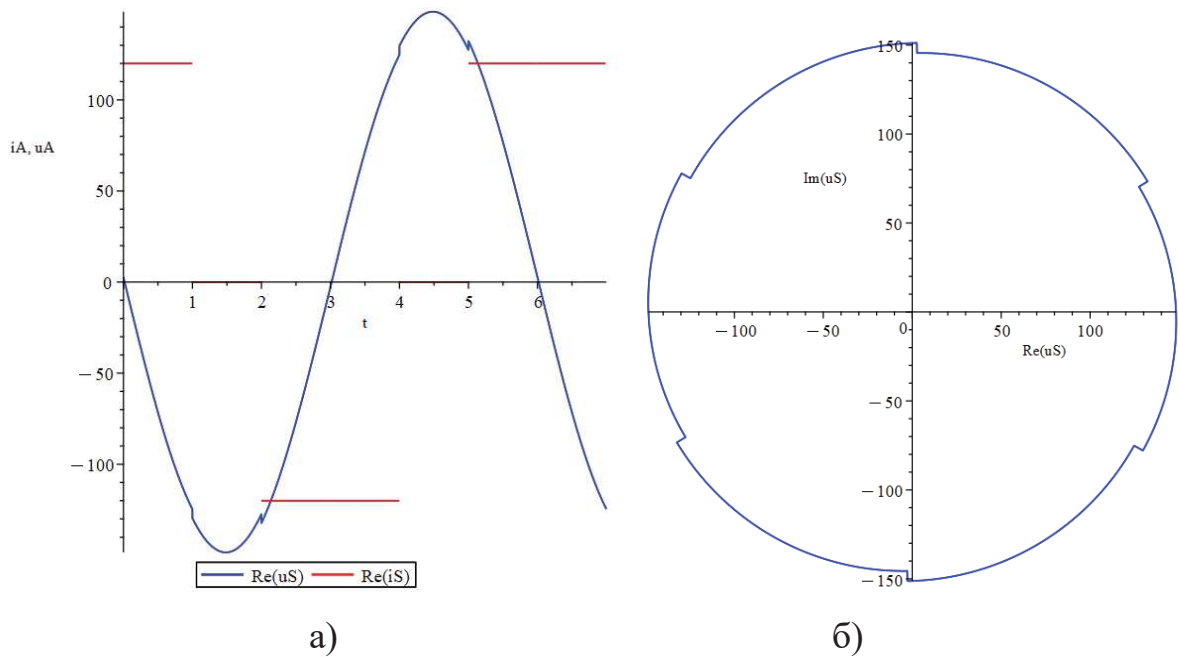


Рисунок 3.25 – Годограф напруги АД, В, (а) та зміна фазних величин напруги, В і струму статора, А, (б)

3.5.4 Режим торкання (пусковий режим)

У цьому режимі пускова частота і заданий пусковий струм вибираються пропорційно необхідному пусковому моменту, який у тяговому рухомому складі дорівнює півтора-дворазової величини номінального моменту. У цьому випадку пускова частота

$$f_n = 1.5f_{2H} = 1.5 \times 0.53 = 0.795 \text{ Гц,}$$

заданий пусковий струм

$$i_d = 1.5 \times 360 = 540 \text{ А,}$$

період комутації:

$$\tau = 1/(6f_n) = 0.2096436059 \text{ с.}$$

На рисунках 3.26–3.29 наведено результати розрахунків пускового режиму.

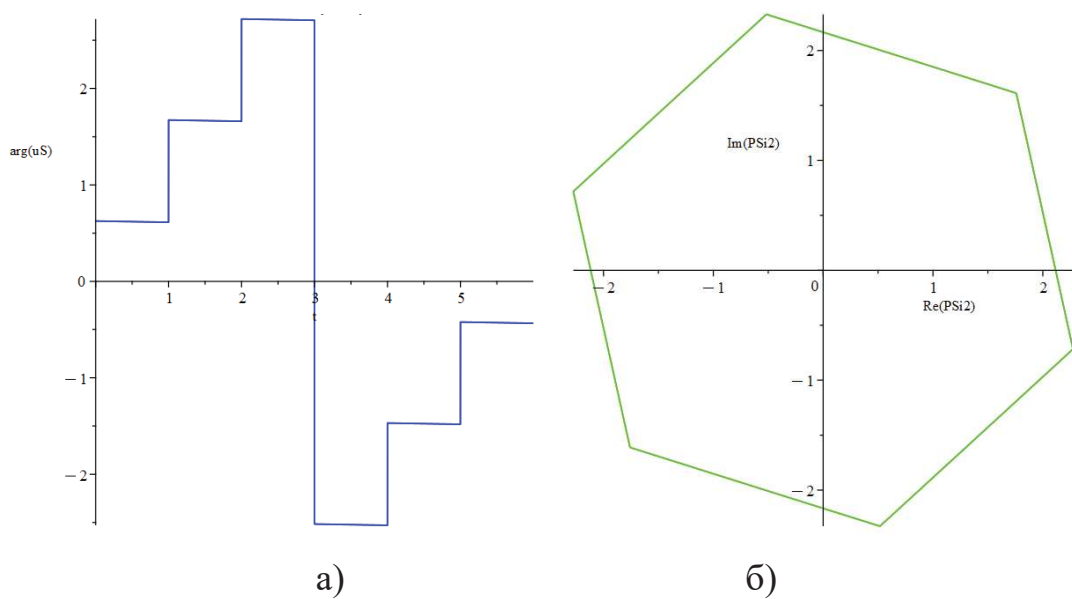


Рисунок 3.26 – Вектор потокозчеплення ротора у режимі торкання:

а) годограф, Вб; б) зміна у часі фази, ел. рад.

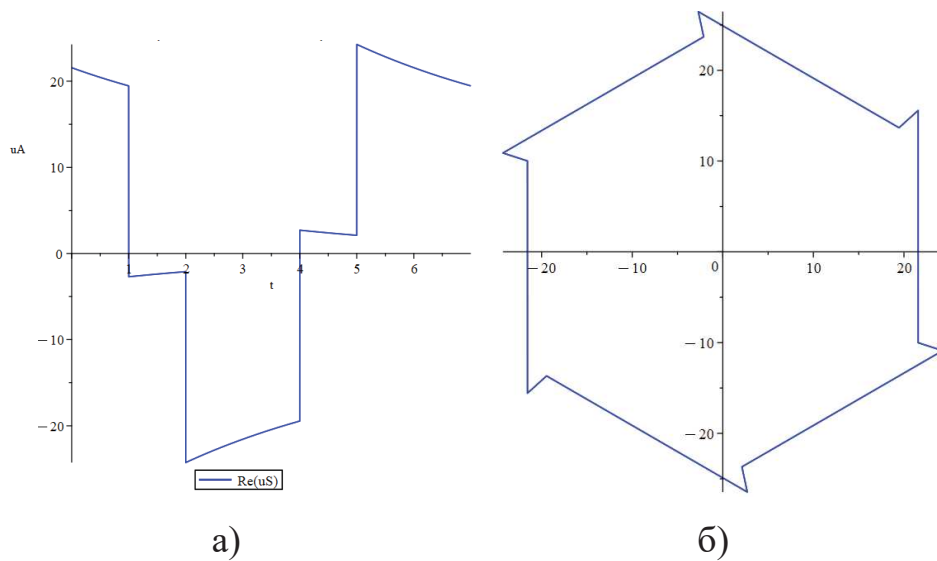


Рисунок 3.27 – Струм ротора в пусковому режимі АІТ - АТ:

а) годограф, Вб; б) зміна у часі фазного струму ротора та струму статора, А

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

64

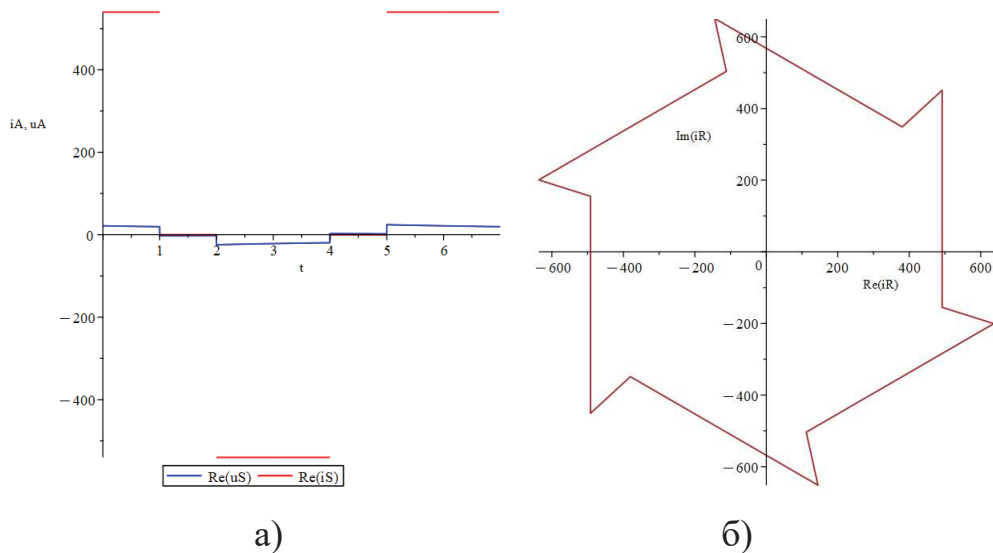


Рисунок 3.28 – Напряга статора в режимі торкання, В:
 а) годограф; б) залежність фазної напруги від часу.

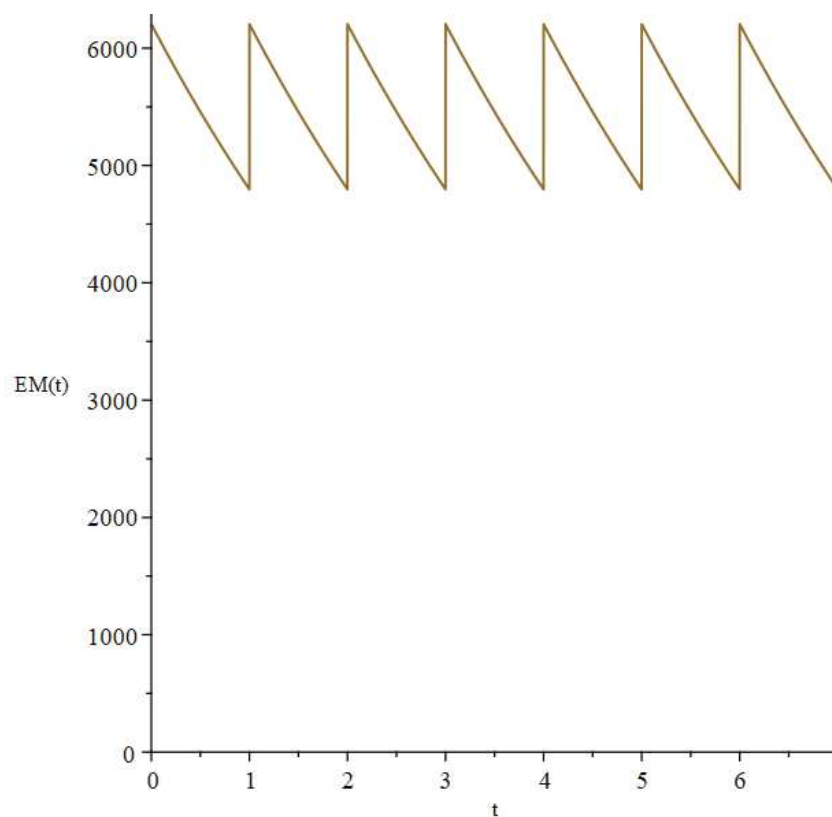
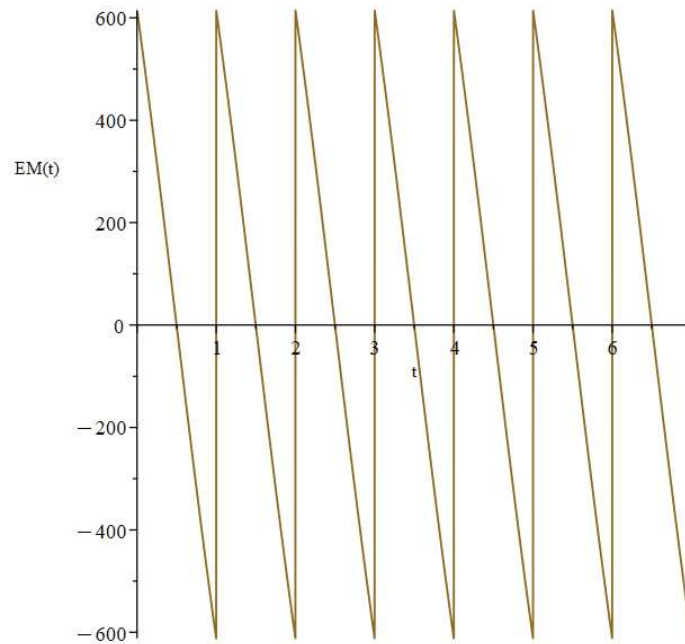


Рисунок 3.29 – Електромагнітний момент АДД, Нм, в режимі старту

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



3.6 Висновки до третього розділу

Було проведено моделювання роботи асинхронного тягового приводу в різних режимах: розгону, гальмуванню, холостого ходу.

Отримані годографи струмів та напруги у приводі.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ВИСНОВКИ

Сучасні тягові електроприводи для електромобілів демонструють значний прогрес у напрямку підвищення ефективності, надійності та зменшення габаритів. Вибір типу двигуна та схеми передачі залежить від призначення автомобіля, вимог до динаміки, вартості та інших факторів. Подальший розвиток технологій, таких як інтегровані електроприводи та використання нових матеріалів в інверторах, сприятиме покращенню характеристик електромобілів та їх широкому впровадженню.

Розроблено методику проектування асинхронного тягового приводу, засновану на працях, що використовує як початкові дані геометрію осердя статора і бере до уваги електромеханічні характеристики як один із критеріїв ефективності двигуна. Проведені відповідні розрахунки.

Було проведено моделювання роботи асинхронного тягового приводу в різних режимах: розгону, гальмуванню, холостого ходу. Отримані годографи струмів та напруги у приводі.

Розроблена модель може бути використана для подальшого проектування приводу електротранспорту, для якого передбачено використання двигунів потужністю до 65 кВт на кожному вісь.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дипломний проект – КПІ. Аналітичний огляд в області тягового електроприводу транспортних засобів. <https://ela.kpi.ua/bitstreams/633bf4ac-e69c-414a-a196-884ba79dedb9/downloadELAKPI+1ELAKPI+1>
2. Review of Electric Vehicle Traction Motors, Control Systems, and Various Implementation Cards. https://www.researchgate.net/publication/380518707_Review_of_Electric_Vehicle_Traction_Motors_Control_Systems_and_Various_Implementation_CardsResearchGate+1JoAPE+1
3. Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923018603ScienceDirect+1Re Public Polimi+1>
4. Вінницький національний технічний університет – Огляд наукових праць, присвячених дослідженню електромобілів з тяговими електроприводами змінного струму. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Dis/dis_Horeniuk.pdfPDF VNTU
5. Electric Vehicle Traction Drives and Charging Station Power Electronics: A Review. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/6037>
6. Jape and Thosar, Comparison of electric motors for electric vehicle application, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, eISSN: 2319-1163 pISSN: 2321-7308, (2017).
7. K.W.E Cheng, Recent Development on Electric Vehicles, International Conference on Power Electronics Systems and Applications, K210509001, (2009).
8. Ryan Sprague, An analysis of current battery technology and electric vehicles, Journal of undergraduate research 5,1 (2015).
9. Mohd and Zulkifli, Electric Vehicle Energy Management System Using National Instruments' CompactRIO and LabVIEW, ICSIMA: IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurements and Applications, 978-1-4799-0843-1, (2013).

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

10. Chan and Lo, Control Strategy of PWM Inverter Drive System for Electric Vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. IE34, NO. 4, (1987).
11. Government plans new policy to promote electric vehicles, The Economic Times, Aug 02, 2018
12. Motor vehicle. [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle
13. Global EV Outlook 2021 [Online] Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
14. The Electric Vehicles Initiative (EVI). [Online] Available: <https://www.iea.org/programmes/electric-vehicles-initiative>
15. Trends and developments in electric light-duty vehicles. Electric cars had a record year in 2020, with Europe overtaking China as the biggest market. [Online] Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-anddevelopments-in-electric-vehicle-markets>
16. Global electric vehicle stock by region, 2010-2020. [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-vehicle-stock-by-region-2010-2020>
17. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатов, А.В. Колесніков. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
18. Дослідження системи рекуперації кінетичної енергії при динамічному гальмуванні в автотранспортних засобах з електроприводом. Студентська наукова робота зі спеціальності «Автомобільний транспорт» - 2021, 35 с. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/АВТОМ ТРАНСП/Авт та тракт 2020/new_r/R_екуператиya.pdf
19. Магістерська робота. Підвищення ефективності електроспоживання системи міського електротранспорту. Хоревич Є.І./Запоріжський національний університет. – 2021, 95 с.
20. Дипломний проект – КП. Асинхронний електропривод трамвая/ Вещиков Г.І./КП, - 2020, 69 с.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

21. Simulation of induction motor startup. MotorAnalysis. Example 1. N.p., n.d. Web. 29 June 2017.
22. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с.
23. Комп'ютерна дискретна математика (Частина 1): Розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою “Інженерія програмного забезпечення розподілених систем” спеціальності 121 “Інженерія програмного забезпечення” / Л. І. Кублій; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл: 10,041 Мбайт). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 165 с.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70