

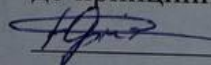
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

KPM.273.42.13.24.01 ПЗ

Розробив: студент групи 214-ЕЕ-Д23
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»
(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

 Олексій ЮРЧАК

Керівник: к.т.н., доцент
Андрій МАСЛІЙ

Рецензент: к.т.н., доцент
Олександр ОБОЗНИЙ

Харків – 2024

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

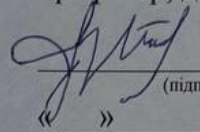
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

 Михайло БАБАЄВ
(підпис)
«__» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Юрчака Олексія Валерійовича

1 Тема «Розробка електроприводу електромобіля та дослідження режимів його роботи.», керівник Маслій Андрій Сергійович, к.т.н., затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від 30 вересня 2024 року № 42.

2 Строк подання студентом закінченої роботи 03 січня 2025 року.

3 Вихідні дані: автомобіль Daewoo Lanos, бензинового двигуна A14SMS, акумуляторна батарея LT-LFP 130, тяговий асинхронний двигун.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки

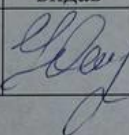
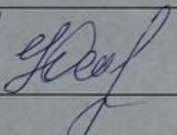
- 1) Історія виникнення електромобілів
- 2) Структурні схеми існуючих електромобілів
- 3) Тяговий розрахунок електромобіля та вибір потужності електричного двигуна
- 4) Моделювання роботи базового варіанта автомобіля
- 5) Моделювання роботи електромобіля на базі Daewoo Lanos
- 6) Економічна частина.

5 Перелік графічного матеріалу

- 1) Аналіз історії розвитку та сучасних схем електромобілів – один слайд (формат A4).
- 2) Імітаційне моделювання роботи автомобіля Daewoo Lanos – один слайд (формат A4).

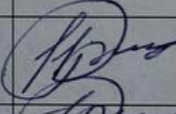
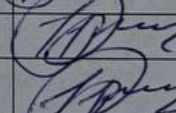
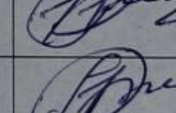
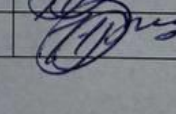
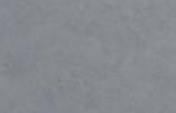
- 3) Результати імітаційного моделювання – один слайд (формат А4).
- 4) Переваги та недоліки застосування тягового асинхронного привода – один слайд (формат А4).
- 5) Результати моделювання прямого пуску асинхронного двигуна Mitsubishi i-MiEV – один слайд (формат А4).
- 6) Результати моделювання асинхронного двигуна з векторним керуванням – один слайд (формат А4).
- 7) Моделювання роботи акумуляторної батареї – один слайд (формат А4).
- 8) Імітаційна модель роботи електромобіля з асинхронним приводом та векторним керуванням – один слайд (формат А4).
- 9) Результати імітаційного моделювання – один слайд (формат А4).

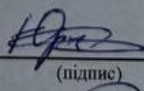
6 Консультанти окремих розділів

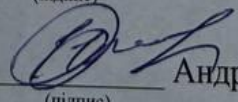
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, канд. екон. наук		

7 Дата видачі завдання: 02 жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	02.10-07.10.24	
2 Збирання та обробка статистичної інформації.	08.10-18.10.24	
3 Виконання роботи по розділам кваліфікаційної роботи.	19.10-19.12.24	
4 Перевірка виконаних завдань у керівника кваліфікаційної роботи, виправлення помилок.	20.12-24.12.24	
5 Робота над оформленням графічної частини.	25.12-31.12.24	
6 Нормоконтроль. Підготовка до захисту.	01.01-05.01.25	

Студент  Олексій ЮРЧАК
(підпис)

Керівник  Андрій МАСЛІЙ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 95 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 58 рисунків, 9 таблиць, 12 літературних джерела.

Ключові слова: Daewoo Lanos, двигун внутрішнього згорання, електромобіль, асинхронний привід, векторна система керування, імітаційна модель, акумуляторна батарея

Об'єктом дослідження є асинхронний привід електромобіля з векторним керуванням швидкості.

Метою дослідження є розробка та дослідження основних характеристик роботи електромобіля з асинхронним приводом та векторним керуванням швидкості, створеного на базі Daewoo Lanos.

У кваліфікаційній роботі розглянуто основні недоліки автомобілів з двигунами внутрішнього згорання, розроблено імітаційну модель роботи такого автомобіля. Запропоновано заміну двигуна внутрішнього згорання на асинхронний. Розроблено імітаційну модель роботи електромобіля з асинхронним приводом, синтезовано регулятор швидкості асинхронного приводу та змодельована його робота.

ABSTRACT

This qualification paper includes 95 sheets of A4 explanatory note, including 58 pictures, 9 tables, 12 literary sources.

Keywords: Daewoo Lanos, internal combustion engine, electric car, asynchronous drive, vector control system, simulation model, rechargeable battery

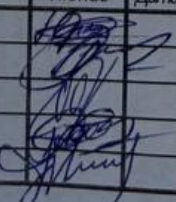
The object of research are power switched reluctance drive electric vehicle with vector speed control.

The aim of research is the development and research of the main characteristics of the electric vehicle with a power switched reluctance drive and modal speed control, created on the basis of Daewoo Lanos.

In the qualification work the main disadvantages of cars with internal combustion engines are considered, the simulation model of work of such a car is developed. The replacement of an internal combustion engine with an induction valve is proposed. A simulation model of the operation of an electric vehicle with an asynchronous drive has been developed, a speed controller for the asynchronous drive has been synthesized, and its operation has been simulated.

Зміст

Вступ	7
1 Історія виникнення електромобілів	9
2 Структурні схеми існуючих електромобілів	14
2.1 Будова електромобіля	14
2.2 Схема електропостачання електромобіля	19
2.3 Силова схема електромобіля	25
3 Тяговий розрахунок електромобіля та вибір потужності електричного двигуна	27
4 Моделювання роботи базового варіанта автомобіля	31
4.1 Імітаційне моделювання роботи ДВЗ	35
4.2 Дослідження роботи автомобіля на імітаційній моделі	51
5 Моделювання роботи електромобіля на базі Daewoo Lanos	53
5.1 Імітаційне моделювання акумуляторної батареї	53
5.2 Математичне моделювання асинхронного електропривода з векторною системою керування	64
5.3 Імітаційне моделювання роботи електромобіля з асинхронним тяговим електроприводом	81
6 Економічна частина	84
6.1 Коротка характеристика запропонованих технічних рішень	84
6.2 Стисла методика розрахунку економічного ефекту	85
6.3 Визначення одноразових витрат	86
6.4 Розрахунок річних експлуатаційних витрат	87
Висновки	93
Список використаних джерел	94
Додаток А	95

КРМ.273.42.13.24.01 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Юрчак		
Перевір.		Маслій		
Рецензент		Обозний		
Н. Контр.		Маслій		
Затверд.		Бабаєв		
Розробка електроприводу електромобіля та дослідження режимів його роботи				
		Літ.	Арк.	Аркуші
		6	6	95
УкрДУЗТ кафедра ЕТЕМ				

Вступ

З кожним роком стає все більш очевидним, що необхідність охорони довкілля надає все більший вплив на розвиток автомобільної промисловості. Світовий парк автомобілів щорічно збільшується на 5 - 8%. У цих умовах все більш актуальним стає завдання щодо усунення шкоди сучасних автомобілів – забруднення атмосфери відпрацьованими газами. Зростаючий рівень забруднення повітря великих міст дуже гостро поставив питання про розробку комплексу заходів щодо зменшення вмісту токсичних речовин в атмосфері.

За документами опублікованими в США, забруднення повітря у великих містах визначається наступними факторами (загальний рівень забруднення прийнятий за 100%):

- автомобілі 60%;
- промисловість 19%;
- електростанції 12%;
- побутові установки 6%;
- спалювання сміття 3%.

З цього випливає, що основна частина викидів токсичних речовин в атмосферу припадає на автомобільний транспорт. Це обумовлює пред'явлення до автомобільної промисловості вимог щодо зниження рівня виділення токсичних речовин при роботі автомобіля. вирішення цієї проблеми йде за двома напрямками:

Перший напрямок полягає у застосуванні нейтралізаторів і фільтрів в системах викиду газу, причому силові установки автомобіля майже не змінюються. Однак до цього часу не вдалося створити прості, дешеві, довговічні і ефективно діючі системи, що забезпечують очищення відпрацьованих газів по всіх шкідливих компонентах. І існує думка, що створити нешкідливий двигун, який би відповідав зазначеним вище вимогам, навряд чи вдасться. Тому все частіше в різних країнах обговорюється питання про можливість заборони або часткового обмеження використання автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння в містах та окремих районах. Додаткову шкоду сучасні автомобілі створюють своїм шумом. З кожним

роком, у міру зростання парку автомобілів, проблема зниженні шуму, що створюється ними, набуває все більш гострий характер.

Другий напрямок полягає в розробці практично нетоксичних транспортних засобів. До таких засобів відносяться електромобілі, у яких немає ДВЗ, і які до того ж дозволяють знизити шкідливий вплив транспортного шуму до мінімуму.

Аналіз робіт зі створення електромобілів починаючи з його зародження до сьогоднішніх днів показує, що можна виділити шість періодів розвитку електромобілів:

- перший – зародження (1837-1895 рр.);
- другий – інтенсивний розвиток і конкуренція (1896-1930 рр.);
- третій – локальне використання (1931 - 1960 рр.);
- четвертий – широке проведення дослідно-конструкторських робіт і випуск великої кількості дослідних зразків і малих серій електромобілів (1961-1982 років.);
- п'ятий – спад робіт, невдачі викликані недосконалістю джерел енергії (1982-2000 рр.);
- шостий – активізація діяльності в області електромобілебудування в зв'язку з ускладненням екологічної обстановки. З'явилися нові типи джерел струму. Усвідомлення невідворотності кризи з видобутком вуглеводнів після 2030 року.

1 Історія виникнення електромобілів

На рубежі століть (19-20) інтерес до електромобілів був настільки великий, що часом їх виробництво і збут перевищували такі ж показники в галузі автомобілебудування. Електромобілі привертали до себе увагу акуратністю, безшумністю, простотою управління і відсутністю вихлопних газів. Невеликий запас ходу, необхідність частих підзарядок акумуляторів або повної заміни важких батарей тоді мало бентежили покупців. Переважно це були представники аристократії, і електромобіль в їх очах був чистенькою і зручною іграшкою – на відміну від пропахлих бензином і мастилом, чадних і галасливих бензинових екіпажів. До кінця 19 століття кількість електромобілів перевищувала кількість чадних побратимів в рази. В той час швидкість і дальність пробігу авто були не такі істотні як зручність і простота обслуговування і догляду, тиша і комфортність поїздки, швидкість запуску двигуна.

У багатьох країнах Європи і Америки кількість фірм, які виробляли електромобілі, обчислювалася десятками. Електромобілями займалися як окремі відомі винахідники – такі, як, наприклад, російський інженер Іполіт Романов, - так і великі фірми: французька "Жанго", англійська "Берсе", австрійська "Лорнер" та інші. Найбільш популярні електромобілі були в Америці.

Перші електромобілі були зібрані в 1830-40-хх роках. Прийнято вважати першопрохідцями в цій справі англійців Роберта Андерсона, Роберта Девідсона і американця Томаса Девенпорта.

Відомо, що англієць Девідсон в 1938 році зібрав перший електромобіль всього через шість років після відкриття Фарадеєм електромагнітної індукції. Перші екземпляри були незграбні споруди зі швидкістю менше швидкості пішохода. Швидкості росли досить швидкими темпами. У 1895 році був встановлений рекорд швидкості 63,15 км / год. А в 1899 році був подоланий і 100 кілометровий кордон. Рекорд встановлений бельгійцем Камілем Женатци у французькому місті Ашер (близько Парижа) на електромобілі "La Jamais Contente".

Машина мала обтічний корпус зі сплаву алюмінію і вольфраму. Корпус був схожий на торпеду (ракету), встановлену на шасі (рисунок 1.1). Вага була близько тонни і швидкість досягла 105,88 км / год.



Рисунок 1.1 – Електромобіль "La Jamais Contente"

Винахідник Уолтер Бейкер (1868-1955) вважався засновником електромобільного бізнесу в Америці і взагалі піонером американської моторизації. Перше дітище Бейкера за своїм зовнішнім виглядом майже нічим не відрізнялося від автомобілів Генрі Форда, Олде або Паккарда тих років. Це був легкий і високий 2-місний візок на 4-х велосипедних колесах з загнутим вгору передком і рульовим важелем (рисунок 1.2). Через наявність акумуляторів електромобіль вийшов занадто важким, і Бейкер оснастив його м'якою підвіскою на еліптичних ресорах. Новинками тих років були електричні фари і електричний гудок. Акумуляторна батарея дозволяла їздити 6-8 годин без підзарядки.

У 1901 році цей електромобіль був модернізований. Він став виглядати солідніше – отримав тент, кермо і був оснащений подвійним сидінням зі спинкою і підлокітниками. Акумулятори розміщувалися під сидінням, а електромотор в 0,75

кінських сил приводив в рух задню вісь за допомогою ланцюгової передачі. Машина розвивала швидкість 30 км/год і на одній зарядці могла проїхати 80 км.



Рисунок 1.2 – Електромобіль Уолтера Бейкер

У 20-му столітті електромобілі поступилися місцем автомобілям. Головною причиною були акумулятори, їх недосконалість. Через них запас ходу не був великий, а виробництво автомобілів розширювалося, вони ставали більш комфортабельними та дешевими завдяки чому набули найбільшого поширення.

У теперішній час завдяки досягненням науки і техніки електротранспорт знаходить застосування як внутрішньоміський транспорт. Містами рухаються електроскутери, електровелосипеди, електромобілі. Безперечними перевагами електромобілів є:

- екологічна чистота електродвигуна;
- майже необмежений ресурс електродвигуна;
- безшумність;
- рух у пробках без викиду вихлопних газів;
- більш високий рівень надійності і довговічності при простоті конструкції;
- використання нічних надлишків потужності в електроенергетиці;

- можливість використання екологічних і відновлюваних джерел енергії;
- високий ККД електродвигунів (90-95%);
- регенеративне використання енергії при гальмуванні.

Існує і зворотний бік медалі:

- обмежений пробіг і запас енергії на борту електромобіля;
- низька питома енергоємність акумуляторів і велика вага батареї;
- необхідність розвитку енергетики на вуглеводневого видах палива;
- розширення виробництва акумуляторів на інших матеріалах, ніж свинець, утилізація акумуляторів;
- електромобілі дорогі, часто дорожче автомобілів;
- підвищена витрата електроенергії при розгонах, негативний вплив великих струмів на термін служби акумуляторів;
- не вирішена проблема опалення салону взимку і кондиціонування влітку;
- створення інфраструктури зарядки електромобілів.

Незважаючи на істотні недоліки, є хороші прогнози на масове використання електротранспорту в близькому майбутньому. Багато держав підтримують виробництво електромобіля, існують державні програми з підтримки електротранспорту. Зростає екологічне самосвідомість населення. Любителі-ентузіаста вже зараз мають можливість придбати необхідне обладнання для будівництва електромобілів або конвертувати серійні автомобілі в електромобілі.

Електромобіль перспективний вид транспорту і на даний момент є майже єдиним рішенням проблеми забруднення атмосфери. Тому в даний час багато автовиробників витрачають багато сил на рішення конструктивних проблем електромобіля.

Тому ведуться роботи над створенням акумуляторних батарей з малим часом зарядки (близько 15 хвилин), в тому числі і з застосуванням наноматеріалів. Розглядається також можливість використання в якості джерел струму не акумуляторів, а іоністрів (суперконденсаторів), що мають дуже малий час зарядки, високу енергоефективність (більше 95%) і набагато більший ресурс циклів заряду-розряду (до декількох сотень тисяч). Дослідні зразки іоністорів на графені мають

питому енергоємність 32 Вт·год/кг, порівнянну з такою для свинцево-кислотних акумуляторів (30-40 Вт·год/кг). Розробляються електричні автобуси на повітряно-цинкових акумуляторах. Toyota працює над створенням нового покоління гібридних автомобілів Prius (повний гібрид, plug-in гібрид, PHEV). У новій версії водій за бажанням може включати режим електромобіля, і проїхати на акумуляторах приблизно 15 км. Подібні ж моделі розробляє Ford – модель Mercury Mariner – пробіг в режимі електромобіля 40 км, і Citroen – модель C-Metisse – пробіг в режимі електромобіля 30 км та інші.

Toyota вивчає можливість встановлення пристроїв для зарядки акумуляторів гібридів на бензозаправних станціях. Пошта Японії, починаючи з 2010 року, планує придбати 21000 електромобілів для доставки поштових відправлень на коротку відстань.

2 Структурні схеми існуючих електромобілів

2.1 Будова електромобіля

В даний час ще немає остаточного визначення поняття електромобіль. Іноді електромобілі виділяються по роду приводу, розуміючи при цьому «безрейкові транспортні засоби з автономним електроприводом». Але до цього типу можуть бути віднесені в тому числі і кар'єрні вантажівки. В інших випадках до електромобілів відносять за типом споживаного палива. Тоді сюди можуть бути віднесені і транспортні засоби з двигуном внутрішнього згоряння на борту або паливні елементи, що працюють на нафтопродуктах. Більш повним можна вважати визначення дане О.А.Ставровим [3]: «Під терміном електромобіль мається на увазі автомобіль, у якого для приводу ведучих коліс використовується електрична енергія, що отримується від хімічного джерела струму ». Уточнюючи сучасне розуміння терміну електромобіль необхідно відобразити наступне:

- автономність електроустановки і самого електромобіля;
- використання в якості першоджерела енергії хімічного джерела струму.

Таким чином, електромобіль – це безрейковий транспортний засіб з автономним хімічним джерелом струму (напруги) використовуваним а як джерело енергії для руху.

Особливості конструкції електромобіля обумовлені наступними проблемами:

- забезпеченням балансу маси електромобіля при відносно великій масі джерел енергії у вигляді тягової акумуляторної батареї;
- просторовим розміщенням тягової акумуляторної батареї значного об'єму, що забезпечує прийнятні показники конструкції електромобіля, при достатній зручності в експлуатації;
- опалення салону. Ця проблема останнім часом не привертає увагу широкого кола фахівців. Однак для зимових умов нашої країни при загальному дефіциті

енергії на електромобілі вона виявляється вельми суттєвою. Для забезпечення прийнятних умов в кабіні водія і для досить швидкого розморожування вітрового скла необхідна потужність порядку 3-6 кВт, яка порівнянна з потужністю, потрібної для руху електромобіля. Але це є проблемою на перших порах. Розробляються системи накопичення енергії з високими питомими показниками накопичуваної енергії, що усуне питання опалення кабіни як енергетичну проблему.

Інші особливості конструкції електромобіля визначаються специфічними можливостями електричних тягових систем, які полягають в наступному:

- високі регульовальні якості електродвигунів дозволяють отримати необхідні межі зміни швидкості руху без перемикання передач;
- малі габарити і маси вузлів електроприводу значно розширюють можливості компонування приводу ведучих коліс;
- поліпшені гальмівні властивості електричних тягових систем дозволяють спростити механічні гальмівні системи.

Крім того внутрішньоміське використання сучасних електромобілів з обмеженою максимальною швидкістю при порівняно високій якості доріг дозволяє знизити вимоги по ряду конструктивних характеристик вузлів і агрегатів, що створює передумови для певного спрощення їх порівняно зі звичайними автомобільними.

Головні показники за якими електромобіль виграє перед простим автомобілем:

- експлуатаційні витрати у електромобіля нижче, ніж у автомобіля з ДВС;
- двигун внутрішнього згоряння працює при високих температурах, вібраціях, в хімічно активному середовищі, потребує рідинного охолодження, має багато рухомих частин. Як наслідок, силовий агрегат електромобіля служить набагато довше, ніж двигун внутрішнього згоряння, сам електромобіль також значно довговічніший, ніж автомобіль з ДВЗ. Акумуляторна батарея – ось єдиний проблемний елемент електромобіля, так як потребує інтенсивному обслуговуванні і заміні кожні 4-5 років.

Для більшості сучасних електромобілів кузов, шасі і багато інших механічних вузлів і агрегатів взяті від серійних автомобілів з ДВС. Лише деякі моделі з самого початку проектувалися як електромобілі, наприклад, GM EV1 або Honda EV-plus. Але ті й інші мають приблизно однаковий склад основних функціональних і допоміжних компонентів, показаних на рисунку 2.1.

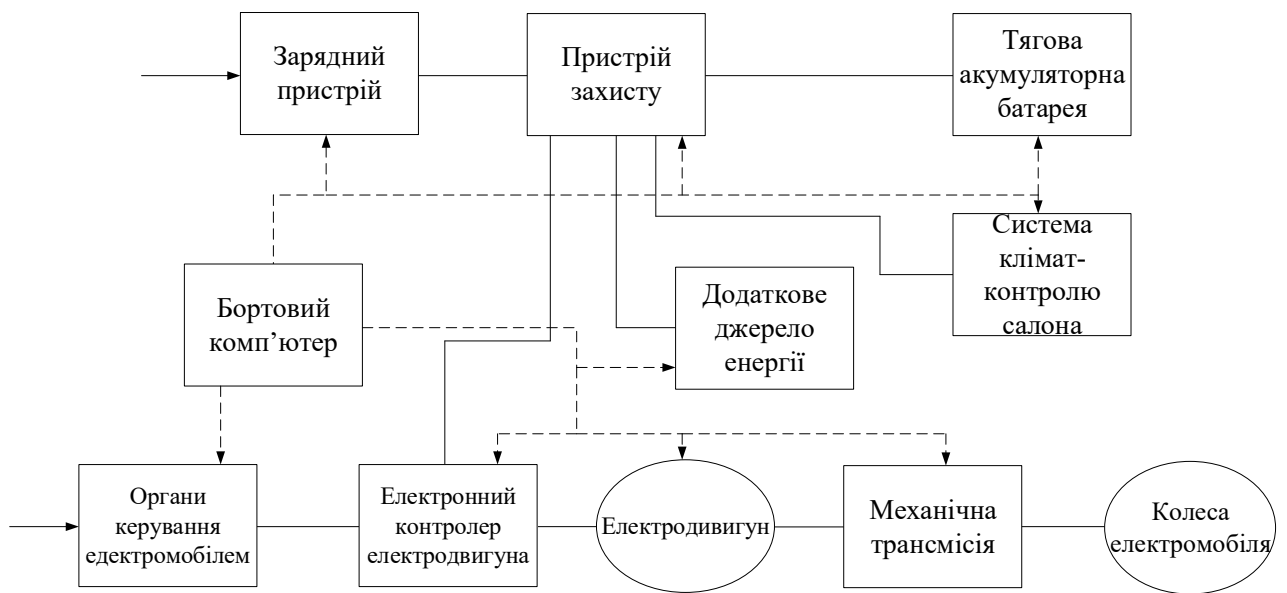


Рисунок 2.1 – Блок-схема електромобіля

На рисунку позначено:

1 Зарядний пристрій. Перетворює змінну напругу зовнішньої мережі в постійну для заряду акумуляторних батарей, тягової і допоміжної.

Він містить ланцюги підключення до мережі змінного струму, випрямляч, регулятор зарядного струму (напруги), систему управління зарядом (зазвичай мікропроцесорну) для контролю за рівнем заряду, параметрами батареї, відключення при виникненні аварійної ситуації.

Зарядний пристрій може розміщуватися на борту електромобіля. В цьому випадку бортовий комп'ютер управляє процесом заряду, а мережа змінного струму підключається до електромобіля.

2 Пристрій захисту (блок реле і запобіжників). Складається з вимикачів, реле, запобіжників, які включені між акумуляторної батареєю і ос ментальною

електричною схемою – споживачами. При виникненні несправності ланцюг змінного струму та акумулятори відключаються. В електромобілях металеві частини корпусу не використовуються в якості провідника (маси), вся електропроводка ізольована від корпусу, колісні покришки (шини) ізолюють корпус від дороги. Порухення ізоляції між електричним колом і корпусом в одній точці не приводить до появи значних струмів, здатних розрядити акумулятори. Пробій в другій точці може стати причиною замикання акумуляторної батареї і небезпечний для користувача.

3 Тягова акумуляторна батарея. Забезпечує енергією двигун електромобіля. Є велика кількість типів акумуляторів, жоден з них повністю не відповідає всім вимогам і немає чіткого критерію вибору оптимального акумулятора. Недостатня ємність, великий час заряду, мала питома енергія акумуляторів обмежують вже багато років зусилля конструкторів електромобілів.

Сьогодні на електромобілях найчастіше встановлюються:

- свинцево-кислотні акумулятори (СК);
- нікель-кадмієві акумулятори (Ni-Cd);
- залізонікелеві акумулятори (Ni-Fe);
- нікель-металгідридні акумулятори (Ni-MH);
- натрієво-сірчані акумулятори (Na-S);
- нікель-хлоридні акумулятори (Ni-Cl).

Перспективні джерела енергії для електромобілів:

- літій-іонні сульфідні акумулятори;
- літій-полімерні акумулятори;
- рідинні паливні елементи;
- інерційні маховики;
- конденсатори надвеликої ємності.

4 Бортовий комп'ютер. Контролює стан основних функціональних компонентів і бортових систем електромобіля. При необхідності ініціює засоби захисту.

5 Додаткове джерело електроенергії (зазвичай допоміжна акумуляторна батарея на 12 В). Забезпечує роботу освітлювальних приладів, панелі приладів, склопідйомників, склоочисників і т. д.

6 Система клімат-контролю салону. Складається з кондиціонера і електрообігрівачів.

7 Електронний контролер електродвигуна. Формує необхідний вид напруги живлення. Управляє числом оборотів і тяговим моментом на валу по командам водія або автоматично.

8 Електродвигун. Надає руху колеса електромобіля безпосередньо або через трансмісію. Спочатку електромобілі оснащувалися звичайними електродвигунами постійного або змінного струму.

Сьогодні на електромобілях використовуються в основному спеціальні електродвигуни змінного струму. До таких електродвигунів пред'являються вимоги високої ефективності при сталості тягових характеристик, необхідності в періодичному техобслуговуванні, здатності витримувати перевантаження і забруднення.

9 Механічна трансмісія складається з коробки передач, диференціала та інших механічних пристроїв для забезпечення руху електромобіля.

10 Водійські органи управління електромобілем – це педалі, кермове управління, важіль управління гальмом, органи управління системами і приладами електромобіля.

11 Рушії (колеса) електромобіля. При застосуванні тягового електродвигуна, колеса мають конструкцію характерну для автомобілів. Але можуть застосовуватися й мотор-колеса, коли електродвигун вбудований в колесо.

2.2 Схема електропостачання електромобіля

При описі електропостачання електромобіля звертаємося рисунку 2.2.

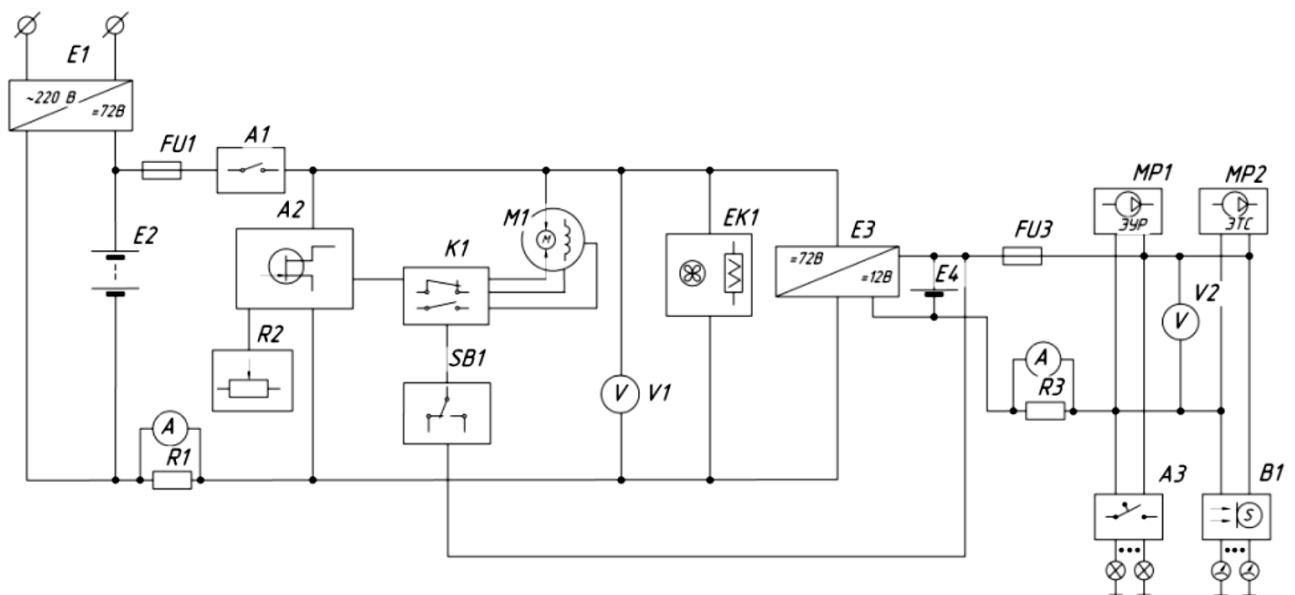


Рисунок 2.2 – Схема електрична функціональна електромобіля

Основою енергетики електромобіля є тягова батарея E2, що складається з шести акумуляторів ємністю 130 А/год. Для збільшення дальності пробігу можливе підключення додаткових ланцюгів акумуляторних батарей. Шість батарей ємністю 130 А/год забезпечують накопичення 9.3 кВт/год енергії на борту електромобіля. Такий вибір акумуляторів забезпечує найбільш оптимальне поєднання ваги енергетичної установки, дальності пробігу і швидкості руху електромобіля при використанні електродвигуна потужністю 7.2 кВт.

У перспективі можливе застосування пристроїв, званих суперконденсаторами або електрохімічними джерелами струму, які підключаються паралельно основній тяговій батареї і полегшують їх роботу в режимах імпульсного підвищеного споживання енергії з батареї. Такі випадки можливі при інтенсивному розгоні електромобіля, коли потрібна віддача батареями струму значної величини перевищує допустиме значення для конкретного типу акумуляторних батарей, також прийом значних струмів в режимі рекуперації (гальмування шляхом перемикання тягового електромобіля в режим генератора).

Заряд основної батареї здійснюється від зарядного пристрою E1 наявного або на борту електромобіля або поза ним. Його завдання забезпечити необхідний струм в найкоротший період часу з дотриманням алгоритму заряду акумуляторної

батарей, рекомендованої заводом-виробником. Сучасні батареї, що використовуються в якості тягових, вимогливі до якості зарядного пристрою. Необхідні пульсації вихідного струму не повинні перевищувати 4%. Струм заряду може досягати величини 1С, що означає значення зарядного струму рівне цифрі зазначеної ємності акумулятора. Вбудований в зарядний пристрій мікропроцесор забезпечує необхідний алгоритм заряду батареї, а при необхідності його десульфатацію.

Пристрій захисту FU1 представляє собою запобіжник на 500 А у вигляді плавкої вставки або автоматичного вимикача з максимально-струмовим захистом. Вид захисту вибирається при прив'язці схеми електропостачання до конкретного екземпляру електромобіля і тому донору (вихідний автомобіль), який використовується для конвертації в електромобіль.

Амперметр R1 являє собою стандартний промисловий шунт типу 75ШСМ-200 і показує прилад зі шкалою 75 мВ. В якості мілівольтметра можливе застосування цифрового вольтметра. Компанія EKITS розробила лінійку електронних амперметрів для застосування на електротранспорті, це SAN003R і SAL0006 працюють також зі стандартним шунтом 75ШСМ. Амперметри прямого виміру в даному випадку застосувати складно через необхідність монтажу силових ланцюгів проводом великого перетину.

Пристрій, що позначений на схемі як А1, позначає сукупність контактів силових контакторів, відповідальних за комутацію силових ланцюгів. Це контакт педалі управління оборотами тягового електродвигуна. При опусканні педалі живлення з електродвигуна знімається для уникнення самовільного руху електромобіля при несправності проводки або електронних пристроїв регулювання струму електродвигуна. Також сюди (А1) належить контакт ключа запалювання, що подає живлення на пристрої управління електромобілем і готує до роботи ланцюг живлення силового електродвигуна.

Регулятор обертів електродвигуна А2 служить для управління оборотами електродвигуна (зміна величини крутного моменту), завдання швидкості електромобіля, а також здійснює необхідні види захистів режимів електродвигуна

по току. Як регулятор для колекторного електродвигуна найчастіше використовується контролер CURTIS. Контролер має лінійку модифікацій для різних електродвигунів.

Резистор R2 являє собою стандартний датчик положення дросельної заслінки від десятого сімейства автомобілів ВАЗ (ДПДЗ). Резистор датчика має повне опір 7.5 кОм з вбудованим в ланцюг рухомого контакту потенціометра резистором величиною 1.5 кОм.

Блок контакторів K1 призначений для завдання напрямку обертання ротора електродвигуна M1 і як наслідок напрямку руху електромобіля «вперед» або «назад». Для зміни напрямку обертання ротора електродвигуна застосовується комутація однією зі статорних обмоток електродвигуна. Більш докладно спосіб комутації розглядається в описі схеми силового обладнання.

У якості блоку контакторів застосовуються або два контактора, або один реверсивний. Перемикання контакторів блоку контакторів K1 здійснюється перемикачем SB1. З його допомогою підключений до джерела живлення на одну з обмоток блоку контакторів. А вони в свою чергу змінюють полярність керуючого струму в обмотках електродвигуна.

Запобіжник FU2 захищає ланцюг живлення блоку контакторів K1. В якості запобіжника можуть бути застосовані або плавка вставка величиною 10 А, або автоматичний вимикач на той же струм спрацьовування.

Електродвигун M1 – це рушій електромобіля. Його крутний момент визначається, як уже раніше згадувалося, регулюється контролером A2, а напрямок обертання його ротора і напрямок ходу електромобіля задає блок контакторів K1.

Як електродвигун для електромобіля застосовуються кілька типів електродвигунів. Це колекторні двигуни постійного струму (ДПС), асинхронні двигуни змінного струму, синхронні двигуни змінного струму або сучасні типи двигунів з вентильним керуванням.

Найбільшого поширення набули ДПС з послідовним збудженням. Нарівні з ними застосовуються ДПС з паралельним збудженням, які дозволяють не

складними засобами реалізувати режим рекуперації енергії при гальмуванні, тобто повернення енергії гальмування в тягову батарею.

Рекуперацію при використанні ДПС послідовного збудження реалізують за допомогою додаткових генераторів приєднаних до трансмісії. Але найчастіше режимом рекуперації жертвують. Це цілком виправдано в деяких застосуваннях електротранспорту, коли ККД (коефіцієнт корисної дії) його використання не суттєвий. Наприклад до таких машин відносяться електрокари, спортивні машини, машини застосовуються для розваг на атракціонах, гольф-кари, представницький транспорт на офіційних заходах, дешеві міські електромобілі для повсякденних поїздок на роботу і назад та ін.

Асинхронні електродвигуни застосовуються досить часто. вперше його застосували при електрифікації автомобіля УАЗ в 70-х роках. Зараз цей тип електродвигунів широко застосовується на серійних гібридних автомобілях і чистих електромобілях. Але для таких двигунів контролер управління трохи дорожче, ніж для ДПС. Тому в одиничних екземплярах електромобілів він застосовується рідко.

Синхронні електродвигуни можливо застосувати на електротранспорті, але реально застосовується рідко через жорсткість його пускових (стартових) електромеханічних характеристик.

Останнім часом багато розробляється електродвигунів з вентильним керуванням. Вони характеризуються потужним електронним пристроєм управління на основі мікропроцесорних систем. Такі електродвигуни перспективні для застосування в електродвигунах, але їх застосування стримує висока вартість. Ці двигуни характеризуються компактністю, високою питомою потужністю на одиницю ваги.

Вольтметр V1 відображає напругу в силовому ланцюзі. при досягненні нижнього значення допустимого зниження напруги тягової батареї E2 необхідно вжити заходів до заряду батареї або припинення його використання.

Пристрій клімат-контролю EK1 складається з обігрівача в зимовий період і (або) кондиціонера в літню пору. У якості обігрівача можливо застосувати різні

пристрої: термообігрівач, що живиться від тягової батареї електромобіля, газовий обігрівач, рідинний обігрівач з паливом у вигляді солярки чи бензину. З цих трьох пристроїв найбільш небезпечним є газовий обігрівач і застосовується досить рідко. Інші легко придбати, вони серійно випускаються промисловістю і не вимагають зміни конструкції електромобіля при його застосуванні.

Перетворювач напруги E2 служить для підзарядки акумуляторної батареї E3 напругою 12 В. Батарея E3 служить для живлення бортових споживачів електричної енергії. Призначення перетворювача E2 полягає в перетворенні вхідної напруги 72 В у вихідну 12 В. У нього не закладається специфічних функцій зарядного пристрою, тому в даному випадку акумуляторна батарея E3 виконує функції буферного пристрою. Цей режим батареї і визначає спрощене улаштування перетворювача E2.

Запобіжник FU3 захищає джерела електроенергії від перевантажень і коротких замикань в електропроводці і приладах. В якості запобіжника можна застосувати плавку вставку або автоматичний вимикач.

Амперметр R2 аналогічний амперметру R1 з меншим діапазоном виміру. Перебудова діапазону вимірювань передбачена в більшості електронних амперметрів. В електротехнічних амперметрах зміна діапазону вирішується шляхом заміни шунта на відповідний з необхідним струмом вимірювання.

Вольтметр V2 аналогічний вольтметру V1.

Електричний підсилювач керма MP1 аналогічний за призначенням гідропідсилювачу керма з тією лише різницею, що для обертання гідронасоса використовується електродвигун невеликої потужності. Він включається в роботу при повороті ключа запалювання і працює до відключення.

Електропідсилювач гальмівної системи MP2 також аналогічний вакуумному підсилювачу. Але тут використовується вакуумний насос, який підтримує певне значення розрідження в ресівері. Ресівер може бути зовнішній або вбудований в вакуумний насос.

Комплект комутуючої апаратури керування світловими приладами A3 і світлові прилади. В якості комутаційної апаратури використовуються тумблери,

підрульові перемикачі, кнопки, проміжні автомобільні реле. Під світловими приладами маються на увазі всі світлові пристрої, передбачені технічними регламентами на виготовлення типу автомобіля (електромобіля).

Комплект приладів В1 призначений для контролю основних параметрів електромобіля. Це швидкість руху, температура тягової акумуляторної батареї, температура тягового електродвигуна, величина тиску в електропідсилювачі керма, розрідження в підсилювачі гальмівної системи, індикація стоянкового гальма, щодо не пристебнутого ремня безпеки, рівня рідини в бачку гальмівної системи, та ін.

2.3 Силова схема електромобіля

При описі силового обладнання скористаємося рисунком 2.3.

Силове обладнання електромобіля працює від батареї E1, що складається з шести акумуляторів ємністю 130 А/год з номінальною напругою 72 В.

Батарея захищена запобіжником (автоматичним вимикачем) FU2 від короткого замикання і перевантаження з боку навантаження і з'єднуючих провідників.

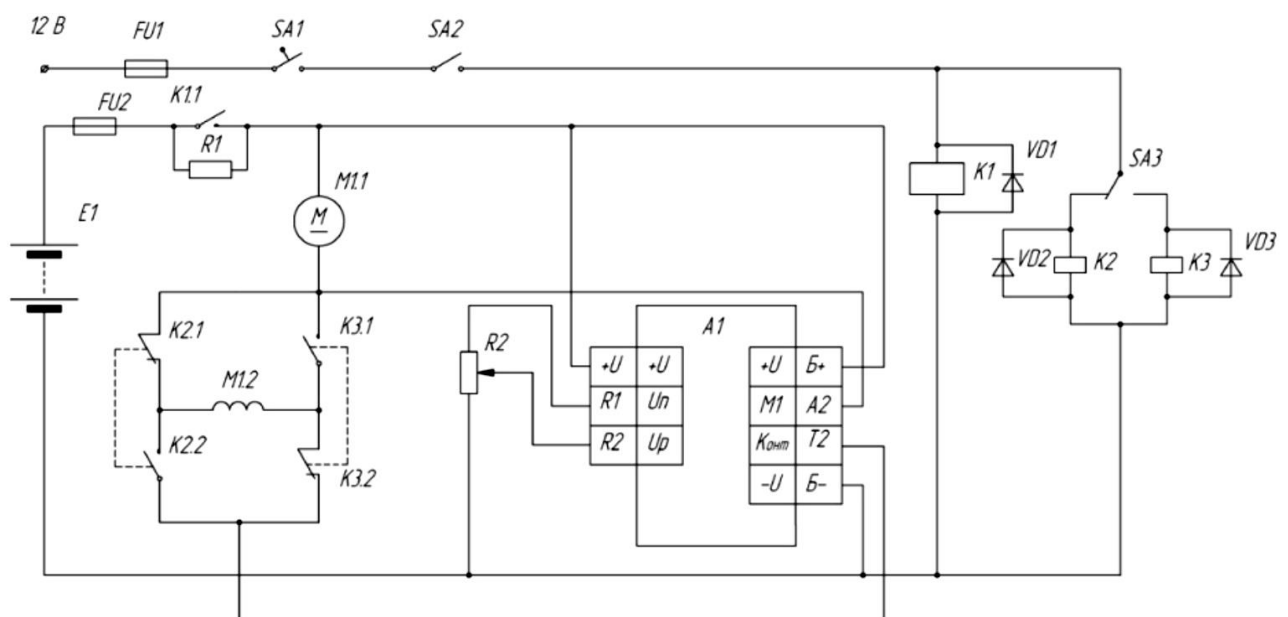


Рисунок 2.3 – Схема електрична функціональна електромобіля

Запобіжник FU1 захищає низьковольтні ланцюги, що живляться від бортової батареї напругою 12 В.

Вимикач SA1 представляє собою головний вимикач (замок запалювання).

Вимикач SA2 – це кінцевий вимикач, розташований на педалі управління оборотами електродвигуна і служить для знеструмлення силових ланцюгів при опусканні педалі щоб уникнути мимовільного руху електромобіля при несправностях в системі електропостачання.

K1 – головний контактор силового ланцюга. На схемі рознесеним способом вказано два графічних зображень цього контактора. K1.1 – контакт, що розриває силовий ланцюг живлення. K1 – обмотка контактора. При подачі живлення на неї здійснюється замикання контакту K1.1.

R1 – шунтуючий резистор. При розмиканні контакту K1.1 через нього подається невеликий струм на вихідний ланцюг контролера управління A1 для забезпечення його роботи в режимі очікування і безударного включення в роботу.

M1 – електродвигун. Графічний елемент M1.1 позначає якірну обмотку електродвигуна, графічний елемент M1.2 позначає статорну обмотку. Статорна обмотка використовується для реверсування руху електромобіля.

K2, K3 – контактори реверсу, аналогічні головному контактору. Графічні елементи K2.1 і K3.2 – нормально замкнуті контакти при положенні перемикача SA3 в стані «ВПЕРЕД» і служать для живлення електродвигуна при русі вперед. K3.1 і K2.2 – нормально розімкнуті контакти, служать для замикання ланцюга живлення електродвигуна при русі назад. Ці два контакти замикаються окремим перемикачем тільки на час руху назад. Графічні елементи K2 і K3 позначають робочі обмотки контакторів керування напрямком обертання електродвигуна.

R2 – резистивний акселератор, служить для управління оборотами електродвигуна за допомогою контролера електродвигуна.

A1 – контролер управління. Служить для перетворення руху педалі управління оборотами електродвигуна в електричні імпульси струму управління цим електродвигуном.

VD1-VD3 – блокуючі діоди, що запобігають імпульсним викидам струму при комутації контакторів. Служать для захисту від радіоперешкод приладів електромобіля і оточуючих радіоприймальних пристроїв.

SA3 – тумблер перемикання напрямку обертання ротора електродвигуна, а відповідно і напрямки руху електромобіля. Пристрій працює наступним чином: Перевіряється стан пристроїв захисту FU1 і FU2, при необхідності переводяться у включений стан. Ключем запалювання (головним вимикачем) готується ланцюг живлення низьковольтних пристроїв. Перемикачем SA3 встановлюється потрібний напрямок руху транспортного засобу, наприклад вперед. Далі при натисканні на педаль управління оборотами спрацьовує кінцевий вимикач SA2, розташований в корпусі резистивного акселератора і пов'язаного тягою з педаллю. При цьому подається напруга на робочу котушку головного контактора K1 і далі замикається контакт K1.1. Напруга живлення контролера A1 і електродвигуна M1 подано.

Подальше натискання на педаль викликає зміну опору резистивного акселератора R2 і отже появу електричних імпульсів на виході контролера A1. На роторі електродвигуна M1 з'являється обертаючий момент. Подальша зміна крутного моменту відбувається пропорційно ступеню натискання на педаль акселератора.

Для зміни напрямку руху ротора електродвигуна, а відповідно і напрямку руху електромобіля необхідно провести повну зупинку ротора електродвигуна і самого електромобіля. Перемикачем SA3 переключити контактори реверсу і плавно натиснути на педаль акселератора.

При закінченні використання електромобіля необхідно розімкнути контакт головного вимикача SA1. А при необхідності провести відключення запобіжних пристроїв FU1 і FU2. А при тривалому простої електромобіля таке відключення обов'язково.

3 Тяговий розрахунок електромобіля та вибір потужності електричного двигуна

Спочатку на електромобілях застосовувалися звичайні електродвигуни постійного або змінного струму. Тобто електродвигуни загальнопромислового застосування. Останнім часом все частіше застосовуються електродвигуни спеціально розроблені для електротранспорту. До них пред'являються вимоги високої економічності зі збереженням тягових характеристик в широкому діапазоні швидкостей, здатність витримувати перевантаження і забруднення, спрощений спосіб обслуговування.

Використовуються трифазні електродвигуни змінного струму з короткозамкненим ротором, керовані контролером шляхом зміни частоти. Вони практично не вимагають обслуговування. ККД таких електродвигунів сильно залежить від обертів і може змінюватися від 82 до 97%. До переваг можна віднести можливість перемикання з «зірки» на «трикутник». При включенні по схемі «зірка» електродвигун має більш високий крутний момент на валу і може застосовуватися при рушанні або важких умовах експлуатації. Перемикання на схему «трикутник» збільшує швидкість обертання валу електродвигуна, що може бути застосовано при розгоні або русі на шосе.

З давніх-давен застосовуються електродвигуни постійного струму. Оберти такого двигуна залежать від напруги живлення, що спрощує спосіб управління ним. Електродвигуни з послідовним збудженням мають хороші тягово-швидкісні характеристики. Але їх ККД трохи нижче ніж у електродвигунів змінного струму, конструкція складніше, потребують періодичного обслуговування, більш чутливі до перевантажень, максимальні оберти трохи нижче. На електромобілях з двигунами постійного струму (ДПС) зазвичай застосовують багатошвидкісні коробки передач (КПП).

У двигунів послідовного збудження статорна і роторна обмотки з'єднані послідовно. При рушанні у таких двигунів момент на валу максимальний, але з

набором обертів за рахунок протиЕРС, що виникає в обмотці збудження момент дещо зменшується.

Ефективність електродвигунів постійного струму збільшується при заміні обмотки статора збудження на постійні магніти. Найбільше поширення вони отримали після винаходу неодімових магнітів. Застосування постійних магнітів в електродвигунах викликало появу безколекторних електродвигунів. Постійні магніти розташовуються на роторі. Статор забезпечується кількома секціями обмотки. Це зазвичай три або чотири обмотки. Електронний комутатор підключає живлення до однієї з обмоток. Ротор забезпечується датчиками положення для визначення його положення і відповідно своєчасного перемикання статорних обмоток. Такий електродвигун простіше, але ускладнення контролера робить його в цілому дорожче звичайних колекторних. Найчастіше його застосовують для розміщення в колесі (мотор-колесо). При цьому магніти розташовуються на ободі, обмотки на нерухомій ступиці. Останнім часом за такими двигунами закріпилася назва вентильних (ВД).

Ще одним різновидом ВД є вентильно-індукторні двигуни ВІД, що знаходять все більш широкого застосування як у промисловості, так і на транспорті. На відміну від двигунів з постійними магнітами, ВІД мають більш просту конструкцію та вищу надійність через відсутність постійних магнітів. ККД таких машин досягає величини 90% і вище. У той час як колекторні електродвигуни можуть мати ККД менше 80%, а серійні асинхронні електродвигуни мають максимум 87.5%.

Для розрахунку потужності електродвигуна задамося вихідними даними електромобіля (автомобіль Daewoo Lanos): повна маса – 1096 кг., коефіцієнт тертя кочення по асфальту – 0.018, коефіцієнт обтічності кузова – 0.32, площа лобового опору – 1.8 м², максимальна швидкість руху 172 км/год.

Необхідна потужність електродвигуна автомобіля:

$$N = g \cdot \mu_{\text{тер}} \cdot m \cdot V + C_x \cdot S \cdot V^2 + g \cdot m \cdot \sin \alpha, \quad (3.1)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$\mu_{тер}$ – сила тертя кочення по асфальту;

m – повна маса транспортного засобу, кг;

V – швидкість руху, максимальна, м/с;

C_x – коефіцієнт обтічності, мідель;

S – лобова площа кузова, м²;

α – кут нахилу дорожнього полотна.

Застосувавши зазначену формулу для нашого випадку, маємо:

$$N = 9,81 \cdot 0,018 \cdot 1096 \cdot 47,8 + 0,32 \cdot 1,8 \cdot 47,8^2 + 9,81 \cdot 1096 \cdot \sin 15 = 13349,6 \text{ Вт}$$

Для руху електромобіля по асфальту зі швидкістю до 172 км/год і допустимих підйомах 15% дорожнього полотна необхідна потужність на колесах 13,4 кВт.

Необхідно врахувати ККД вузлів електромобіля. ККД двигуна 0,8, ККД редуктора головної передачі 0,9, ККД контролера з втратами на проводах і контакторах – 0,9.

Підсумковий ККД кінематики електромобіля маємо:

$$ККД_з = ККД_д \cdot ККД_{ред} \cdot ККД_к \quad (3.2)$$

$$ККД_з = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,65$$

Реальна необхідна потужність електродвигуна:

$$N_p = \frac{N}{ККД_з} \quad (3.3)$$

$$N_p = \frac{13,4}{0,65} = 20,6 \text{ кВт}$$

Вибираємо електродвигун з потужністю не менше 20,6 кВт. Зі стандартного ряду потужностей електричних двигунів найближчий за значенням є двигун потужністю 22 кВт.

Визначимо місце положення електродвигуна в трансмісії електромобіля. Може бути кілька варіантів застосування електродвигуна:

- двигун підключається безпосередньо до ведучого колеса;
- двигун підключається до осьового диференціалу головної передачі;
- двигун підключається до первинного валу коробки зміни передач.

Кожен з варіантів має свої переваги і недоліки. Підключення електродвигуна безпосередньо до колеса спрощує конструкцію трансмісії, але вимагає підбору тихохідного електродвигуна, вимагає запасу потужності для забезпечення різкого старту. Підключення електродвигуна до осьового диференціалу в повному обсязі розв'язує проблеми запасу потужності для здійснення швидкого старту. Кілька збільшує масу трансмісії порівняно з попереднім варіантом, але дозволяє використовувати більш поширені типи двигунів. Третій варіант – використання коробки зміни передач повністю вирішує проблему зрушення електромобіля з місця, що дозволяє використовувати менш потужні електродвигуни, дозволяє застосовувати електромобіль для руху пересічною місцевістю на низьких швидкостях. При такому способі значно збільшується маса трансмісії за рахунок застосування коробки передач, диференціала моста і інших деталей.

Найоптимальнішим для даного конкретного випадку є другий варіант – підключення електродвигуна до осьового диференціалу, що дозволяє використовувати тягові двигуни стандартної конструкції та не сильно збільшує масу електромобіля.

4 Моделювання роботи базового варіанта автомобіля

Для дослідження показників роботи електромобіля, що розроблений на базі Daewoo Lanos спершу необхідно, та аналізу його ефективності необхідно розробити імітаційну модель роботи базового автомобіля з дослідженням характеристик його роботи.

Для створення імітаційної моделі необхідно записати диференційні рівняння руху автомобіля, які мають вигляд:

- рівняння ефективної потужності

$$N_{V_{\max}} = \frac{G \cdot f \cdot V_{\max} + K_{\epsilon} \cdot F \cdot V_{\max}^3}{\eta_m}, \quad (4.1)$$

де G_n – вага автомобіля, Н;

f – коефіцієнт опору кочення ;

$V_{\max}$ – максимальна швидкість, м/с;

K_{ϵ} – коефіцієнт опору повітря, Н.с²/м⁴;

F – площа лобового опору, м²;

η_m – ККД трансмісії.

$$N = N_{\max} \left[a \frac{n}{n_{N_{\max}}} + b \left(\frac{n}{n_{N_{\max}}} \right)^2 - c \left(\frac{n}{n_{N_{\max}}} \right)^3 \right], \quad (4.2)$$

де a, b та c – коефіцієнти які залежать від типу двигуна

n – значення обертів двигуна;

$n_{N_{\max}}$ – оберти при максимальній потужності двигуна .

Для побудови графіків використовуємо параметри автомобіля приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри автомобіля Daewoo Lanos

Параметр	Базова величина
Об'єм ДВЗ, л	1,4
Потужність ДВЗ, кВт	56,63
Радіус колеса, м	0,298
ККД трансмісії	0,9
Маса, кг	1096

На рисунку 4.1 приведена спрощена імітаційна модель автомобіля Daewoo Lanos, що не враховує особливості роботи ДВЗ.

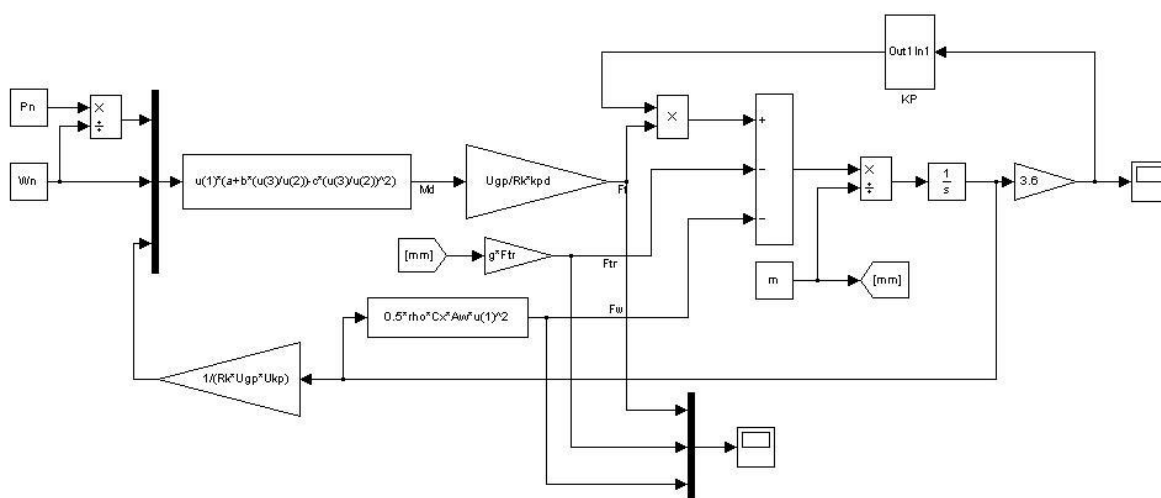


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель автомобіля Daewoo Lanos

Нижче представлені блок-схеми, які являються невід'ємними частинами моделі

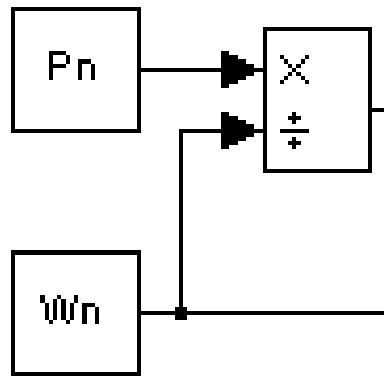


Рисунок 4.2 – Схема розрахунку моменту двигуна

$$M = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (4.3)$$

де M – момент двигуна;
 P_n – потужність двигуна;
 ω_n – кутова швидкість двигуна.



Рисунок 4.3 - Схема розрахунку рушійної сили

$$F_t = \frac{M \cdot U_{gp} \cdot \eta}{R_k}, \quad (4.4)$$

де F_t – рушійна сила приведена до валу коробки передач ;
 M – момент двигуна;
 U_{gp} – передаточне число головної передачі;
 η – ККД головної передачі;

R_k – радіус колеса.

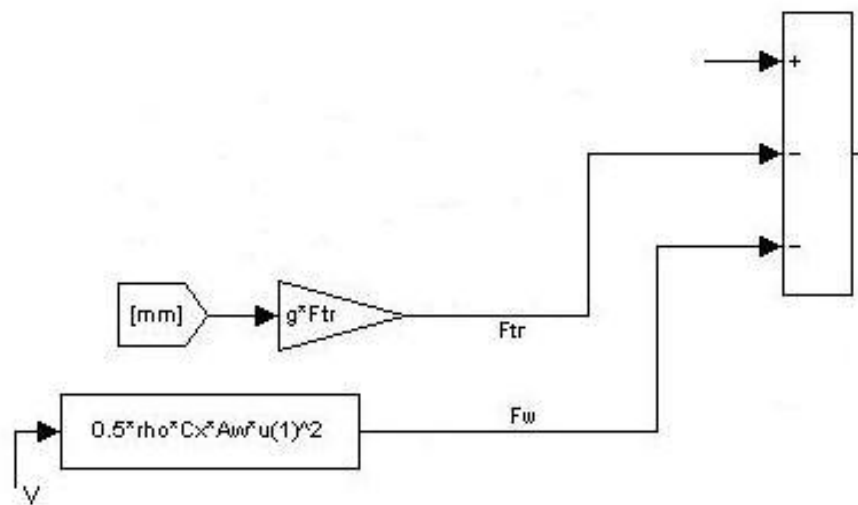


Рисунок 4.4 – Схема розрахунку сили опору

$$F_{tr} \cdot g \cdot m + v^2 \cdot k \cdot A_w, \quad (4.5)$$

де F_{tr} – коефіцієнт опору кочення;

g – прискорення вільного падіння ;

m – маса автомобіля;

v – швидкість автомобіля;

k – коефіцієнт опору повітря;

A_w – площа лобової частини автомобіля.

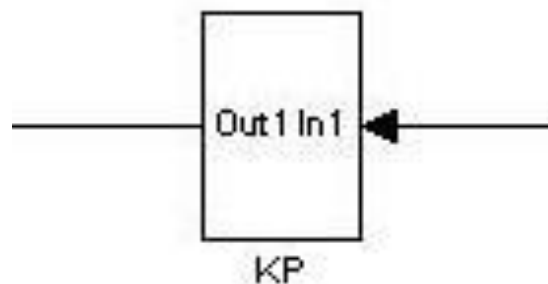


Рисунок 4.5 – Маска моделі коробки передач

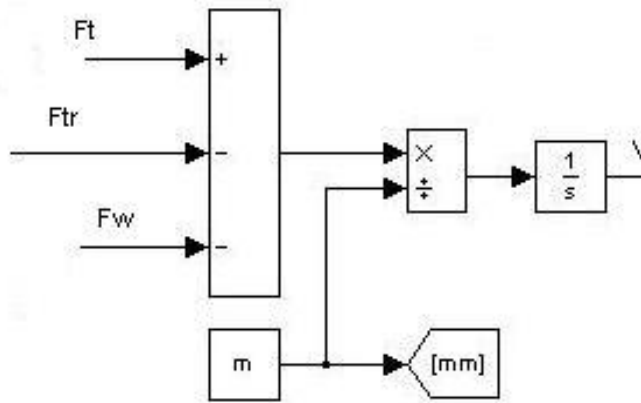


Рисунок 4.6 – Схема перетворення сили на швидкість

Схема перетворення сили на швидкість була складена на основі диференційного рівняння:

$$\frac{F_t - F_{ii}}{m} = \frac{dV}{dt}, \quad (4.6)$$

де F_t – кругова сила на колесі;

F_{ii} – сила опору;

m – маса автомобіля.

4.1 Імітаційне моделювання роботи ДВЗ

В основу імітаційної моделі ДВЗ покладена індикаторна діаграма його роботи. Дані, що наведені у таблиці 4.1 є вхідними для розрахунку та побудови діаграми.

Процеси, що відбуваються в циліндрах поршневого двигуна, можуть бути зображені у вигляді індикаторної діаграми. Індикаторна діаграма – це графічне відображення зміни тиску газу в циліндрі поршневого двигуна в залежності від переміщення поршня або кута повороту кривошипу.

Розрахунок процесу газообміну складається з визначення тиску газів у кінці впуску p_a , коефіцієнта надлишкових газів γ_r , температури газів в кінці впуску T_a і коефіцієнта наповнення свіжим зарядом η_v .

Тиск у кінці впуску, МПа:

$$P_a = P_o - (\beta^2 + \xi_{en}) \cdot \frac{\omega_{шт}^2}{2} \rho_0 \cdot 10^{-6}, \quad (4.7)$$

де P_o – тиск навколишнього середовища, МПа;

$(\beta^2 + \xi_{en})$ – сумарний коефіцієнт, що враховує гасіння швидкості β і опір впускної системи ξ_{en} ;

ω_{en} – середня швидкість руху заряду у прохідному перерізі впускної системи, м/с;

ρ_0 – густина заряду за відомих атмосферних умов, кг/м³:

$$\rho_0 = \frac{P_o \cdot 10^6}{R_n \cdot T_o}, \quad (4.8)$$

де R_n – газова стала повітря, Дж/(кг·К);

T_o – температура навколишнього середовища, К.

Коефіцієнт надлишкових газів:

$$\gamma_r = \frac{T_o + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}, \quad (4.9)$$

де ΔT – підвищення температури заряду у процесі впуску, К;

T_r – температура газів на випуску, К;

P_r – тиск в кінці випуску, МПа;

ε – ступінь стиску;

P_a – тиск в кінці впуску, МПа.

Температура в кінці впуску, К:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}, \quad (4.10)$$

Коефіцієнт наповнення:

$$\eta_v = \frac{\varepsilon P_a}{P_0(\varepsilon - 1)} \cdot \frac{T_0}{T_0 + \Delta T}, \quad (4.11)$$

Тиск у кінці стискання, МПа:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1}, \quad (4.12)$$

де n_1 – показник політропи стискання.

Значення показника політропи стискання визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{2016 + 1,788 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{k_1 - 1} + 1) \cdot T_a}, \quad (4.13)$$

де k_1 – показник адіабати, що визначається з номограми наведеної на рисунку 4.7.

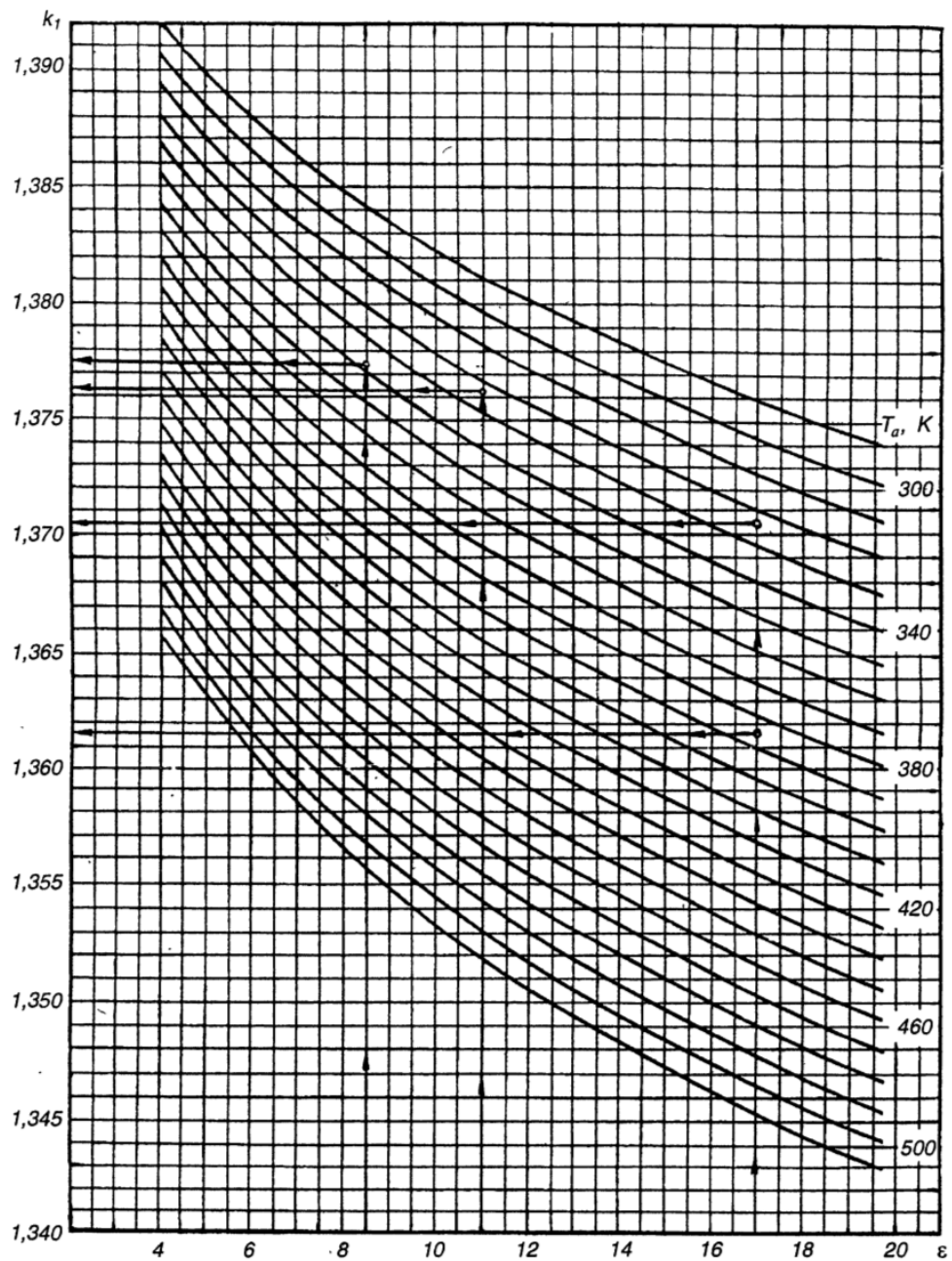


Рисунок 4.7 – Номограма для визначення показника адіабати стиснення k_1

Температура в кінці стискання, К:

$$T_c = T_a \epsilon^{n_1 - 1}, \quad (4.14)$$

Теоретично необхідна кількість повітря для згоряння палива, кмоль/кг:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \quad (4.15)$$

де C , H та O – маса відповідно вуглецю, водню і кисню в 1 кг палива.

Кількість водяної пари в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2}, \quad (4.16)$$

Кількість молей азоту в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot L_0, \quad (4.17)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря.

Справжня кількість повітря і свіжого заряду, кмоль/кг:

$$M_1 = \alpha \cdot L_0, \quad (4.18)$$

Кількість кисню у продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{O_2} = 0,21 \cdot L_0 \cdot (\alpha - 1), \quad (4.19)$$

Кількість вуглекислого газу у продуктах згоряння кмоль/кг:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12}, \quad (4.20)$$

Загальна кількість продуктів згоряння, кмоль/кг:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{O_2} + M_{H_2O} + M_{N_2}, \quad (4.21)$$

Зміна кількості молей горючої суміші під час її згоряння:

$$\Delta M = M_2 - M_1, \quad (4.22)$$

Теоретичний коефіцієнт молекулярної зміни горючої суміші:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}, \quad (4.23)$$

Справжній коефіцієнт молекулярної зміни робочої суміші:

$$\mu = \frac{M_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}, \quad (4.24)$$

Середня молярна теплоємність горючої суміші за сталого об'єму в кінці стиску, кДж/(кмоль·К):

$$mC_v = 20,038 + 2,554 \cdot 10^{-3} T_c, \quad (4.25)$$

Середня молярна теплоємність горючої суміші за сталого тиску, кДж/(кмоль·К):

$$mC_p = mC_v + 8,314, \quad (4.26)$$

Середня молярна теплоємність продуктів згоряння за сталого об'єму в кінці стиску, кДж/(кмоль x К):

$$mC_v'' = \frac{M_{CO_2} mC_{v_{CO_2}} + M_{CO} mC_{v_{CO}} + M_{H_2O} mC_{v_{H_2O}} + M_{N_2} mC_{v_{N_2}}}{M_2}, \quad (4.27)$$

де $M_{CO_2}, M_{CO}, M_{H_2O}, M_{N_2}$ – кількість молей відповідно вуглекислого газу, оксиду вуглецю, водяної пари та азоту у продуктах згоряння, кмоль/кг;

$mC_{v_{CO_2}}, mC_{v_{CO}}, mC_{v_{H_2O}}, mC_{v_{N_2}}$ – середня молярна теплоємність відповідно вуглекислого газу, оксиду вуглецю, водяної пари та азоту у продуктах згоряння, кДж/(кмоль·К).

Кількість теплоти, втраченої внаслідок неповного згоряння 1 кг палива, кДж/кг:

$$\Delta H_{II} = 119 \cdot 10^3 \cdot (1 - \alpha) L_0, \quad (4.28)$$

Підставляємо отримані вирази mC_v'' та ΔH_{II} до рівняння, К:

$$\frac{\xi \cdot (H_{II} - \Delta H_{II})}{M_1 \cdot (1 + \gamma_r)} + mC_v T_C = \mu \cdot mC_v'' \cdot T_z, \quad (4.29)$$

де ξ – коефіцієнт використання теплоти;

H_{II} – нижча теплота згоряння кДж/кг.

Розв'язуємо здобуте квадратне рівняння і визначаємо температуру газів в кінці згоряння як додатне значення кореня квадратного рівняння.

Підставивши здобуте значення температури газів у кінці згоряння до (4.28), дістаємо значення середньої молярної теплоємності і продуктів у кінці згоряння за сталого об'єму mC_v'' .

Тиск газів у кінці згоряння, МПа:

$$P_z = \mu \cdot P_c \cdot \frac{T_z}{T_c}, \quad (4.29)$$

Ступінь підвищення тиску під час згоряння:

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}, \quad (4.30)$$

Під час розрахунку процесу розширення визначають ступінь наступного розширення δ , тиск газів P_n та їх температуру T_n в кінці розширення.

Ступінь наступного розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}, \quad (4.31)$$

Тиск газів у кінці розширення, МПа:

$$P_n = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}, \quad (4.32)$$

де n – показник політропи розширення.

Значення показника політропи розширення визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{23,7 + 0,0046 \cdot T_z \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{k_2-1}}\right) \cdot T_a}, \quad (4.33)$$

де k_2 – показник адіабати розширення, який визначається з номограми наведеної на рисунку 4.8.

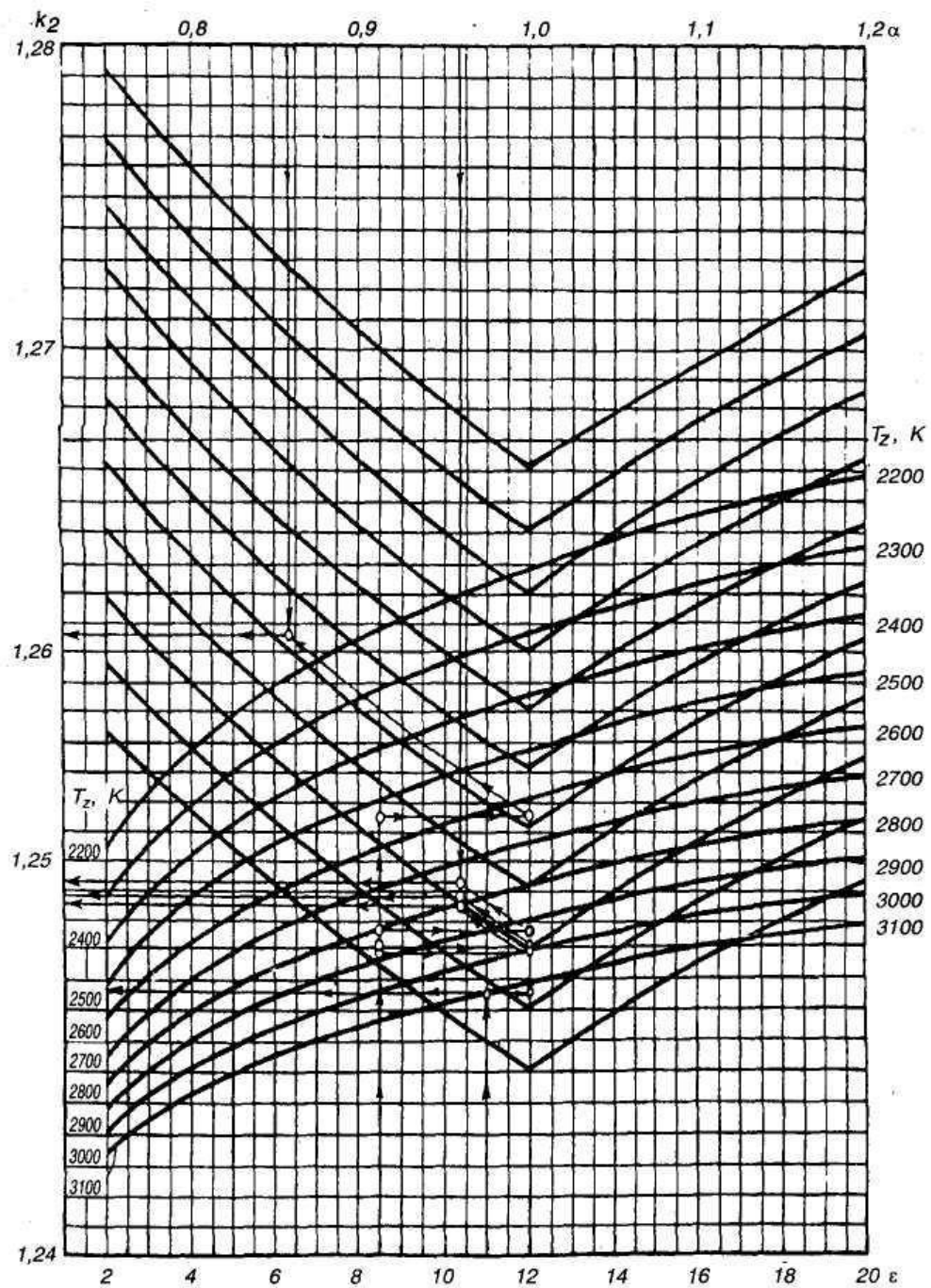


Рисунок 4.8 – Номограма для визначення показника адіабати розширення k_2

Температура газів у кінці розширення, К:

$$T_n = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \quad , \quad (4.34)$$

Під час розрахунку параметрів, що характеризують цикл і роботу ДВЗ визначають середній індикаторний тиск розрахункового P'_i і справжнього P_i циклів, індикаторні ККД η_i і питому витрату палива g_i , ефективні ККД η_e і питому витрату палива g_e , середній ефективний тиск P_e .

Середній індикаторний тиск розрахункового циклу двигуна, МПа:

$$P'_i = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \cdot \left[\lambda \cdot (\rho - 1) + \frac{\lambda \cdot \rho}{n_2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right]. \quad (4.35)$$

Середній індикаторний тиск справжнього циклу двигуна, МПа:

$$P_i = \varphi \cdot P'_i - \Delta P_i, \quad (4.36)$$

де φ – коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми;

ΔP_i – насосні втрати у чотиритактних двигунах.

Індикаторний ККД:

$$\eta_i = 8,314 \cdot \frac{M_1 \cdot T_0 \cdot P_i}{H_u \cdot P_0 \cdot \eta_V}, \quad (4.37)$$

Індикаторна питома витрата палива, г/(кВт·год):

$$g_i = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u \cdot \eta_i}, \quad (4.38)$$

Середній ефективний тиск газів, МПа:

$$P_e = \eta \cdot P_i, \quad (4.39)$$

де η – механічний ККД.

Ефективний ККД:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M, \quad (4.40)$$

Ефективна питома витрата палива, г/(кВт·год):

$$g_i = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u \cdot \eta_e}, \quad (4.41)$$

Індикаторну діаграму будують у вигляді залежності зміни тиску P у циліндрі двигуна від зміни об'ємів V під час переміщення поршня на підставі результатів, визначених у тепловому розрахунку.

Основні параметри роботи ДВЗ представляються у вигляді індикаторної діаграми. Індикаторну діаграму будують у вигляді залежності зміни тиску P у циліндрі двигуна від зміни об'ємів V під час переміщення поршня на підставі результатів, визначених у тепловому розрахунку.

На основі довідкових даних була побудована індикаторна діаграма роботи чотиритактного бензинового двигуна A14SMS, що наведена на рисунку 4.9.

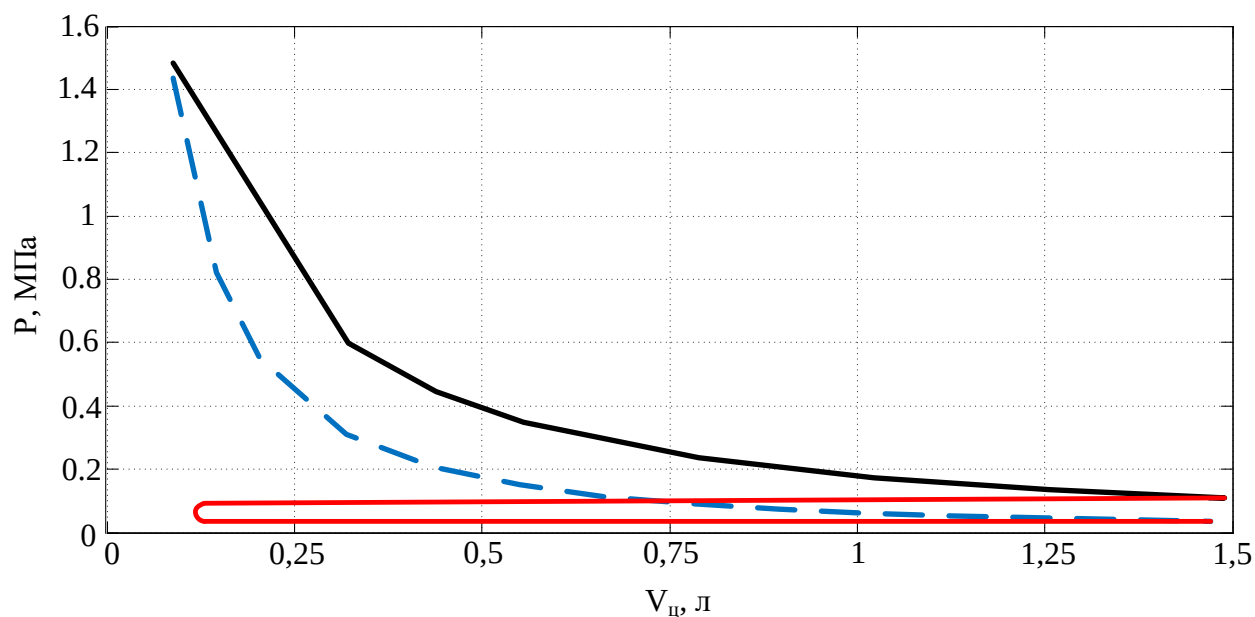


Рисунок 4.9 – Індикаторна діаграма роботи чотиритактного бензинового двигуна A14SMS

Для подальшого створення моделі ДВЗ користування діаграмою у осях P та V є досить незручним, тому наведену діаграму перетворено у діаграму в осях F та S , де F – сила, що діє на поршень, S – переміщення поршня. Діаграма залежності сили, що діє на поршень від переміщення наведена на рисунку 4.10.

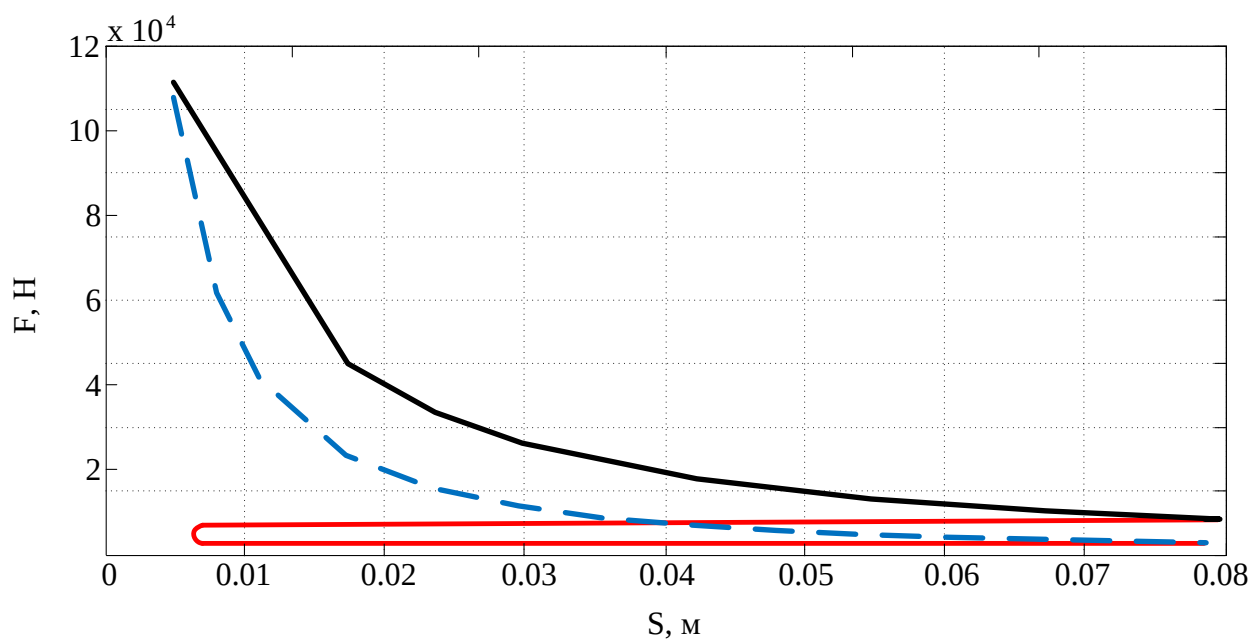


Рисунок 4.10 – Діаграма роботи бензинового двигуна A14SMS

Отримані у результаті розрахунку значення для побудови індикаторної діаграми необхідно апроксимувати неперервними функціями для подальшого їх використання у створенні імітаційної моделі.

Одним зі способів апроксимації даних є інтерполяція. Задача інтерполяції полягає у наступному: задані точки (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$, необхідно знайти функцію $\varphi(x)$, яка проходить через ці точки, тобто

$$\varphi(x_i) = y_i, i = \overline{1, n}. \quad (4.42)$$

Точки (x_i, y_i) мають назву вузли інтерполяції, а функція $\varphi(x)$ – інтерполуюча функція або інтерполятор. На практиці в якості інтерполуючої функції $\varphi(x)$ найчастіше використовуються алгебраїчні поліноми різного виду, при цьому інтерполяція має назву поліноміальної.

Інтерполуюча функція має вигляд:

$$\varphi(x) = \varphi(\vec{C}, x) = C_0\varphi_0(x) + C_1\varphi_1(x) + \dots + C_m\varphi_m(x) = \sum_{k=0}^m C_k\varphi_k(x), \quad (4.43)$$

де $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$ – базисні функції.

Використовуючи умову (2.40) та вираз (2.41), отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \varphi(\vec{C}, x_0) = C_0\varphi_0(x_0) + C_1\varphi_1(x_0) + \dots + C_m\varphi_m(x_0) = y_0 \\ \varphi(\vec{C}, x_1) = C_0\varphi_0(x_1) + C_1\varphi_1(x_1) + \dots + C_m\varphi_m(x_1) = y_1 \\ \dots \\ \varphi(\vec{C}, x_n) = C_0\varphi_0(x_n) + C_1\varphi_1(x_n) + \dots + C_m\varphi_m(x_n) = y_n \end{cases} \quad (4.44)$$

Єдине рішення системи (2.42) існує при двох умовах:

- кількість точок (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$ дорівнює кількості коефіцієнтів C_k , $k = \overline{0, m}$;

- система рівнянь (3) повинна бути не виродженою, тобто визначник системи $\Delta \neq 0$.

Таким чином, якщо виконуються вищезазначені умови, то через точки (x_i, y_i) , проходить єдина функція $\varphi(x) = \sum_{k=0}^m C_k \varphi_k(x)$.

У випадку лінійної поліноміальної інтерполяції базисні функції мають наступний вигляд: $\varphi_0(x) = x^0 = 1$, $\varphi_1(x) = x^1 = x$, $\varphi_2(x) = x^2$, ..., $\varphi_m(x) = x^m$.

Інтерполуюча функція при цьому має вигляд полінома ступеню m : $\varphi(x) = P_m(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_mx^m$ і, як наслідок, система (4.9) має вигляд

$$\begin{cases} C_0 + C_1x_0 + C_2x_0^2 + \dots + C_nx_0^n = y_0 \\ C_0 + C_1x_1 + C_2x_1^2 + \dots + C_nx_1^n = y_1 \\ \dots \\ C_0 + C_1x_n + C_2x_n^2 + \dots + C_nx_n^n = y_n \end{cases} \quad (4.45)$$

У матричній формі систему (4.10) можна переписати, як

$$A \times C = B, \quad (4.46)$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ \dots & & & & \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{bmatrix} \text{ — матриця Ван дер Монда;}$$

$$B = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_n \end{bmatrix}.$$

Рішенням системи (4.45) буде вектор коефіцієнтів полінома C . Через те, що визначник матриці Ван дер Монда завжди відрізняється від нуля, то рішення системи єдине. Для рішення системи (4.45) необхідно знайти зворотну матрицю A . У цьому випадку рішенням буде $C = A^{-1} \times B$.

Таким чином, через задані на інтервалі $[a, b]$ точки $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$ завжди можна знайти єдиний інтерполяційний поліном $\varphi(x) = P_n(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n$, коефіцієнти якого є рішеннями системи (2.44).

Вираз (4.9) визначає поведінку функції $\varphi(x)$ тільки у вузлах інтерполяції $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$. Між вузлами $\varphi(x)$ може вести себе довільним чином, скільки завгодно далеко відхиляючись від залежності $f(x)$. Визначити похибку наближення можна використовуючи вираз для абсолютної похибки $\varepsilon = |f(x) - \varphi(x)|$.

Кращий спосіб перевірити якість інтерполяції – обчислити значення інтерполюючої функції в великому числі точок і побудувати графік. Однак в деяких ситуаціях якість інтерполянта можна проаналізувати. Припустимо, що величина y_i є точні значення відомої функції $f(x)$ в точках x_i . Нехай $P_n(x)$ – єдиний поліном n -го ступеня, що інтерполює функцію по цим точкам $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$. Припустимо, що у всіх точках $x \in [a, b]$ функція $f(x)$ має $(n+1)$ безперервну похідну. Тоді можна показати, що абсолютна помилка інтерполяції $\varepsilon(x) = |f(x) - P_n(x)|$ визначається виразом

$$\varepsilon(x) \leq \frac{|(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_n)|}{(n+1)!} M_{n+1} \quad (4.47)$$

де $M_{n+1} = \max |f^{(n+1)}(x)|$ – максимальне значення $(n+1)$ -ї похідної функції $f(x)$ на інтервалі $[a, b]$.

Описаний вище математичний апарат включений до додатку Curve Fitting Tool середовища Matlab, у якому і проводилась апроксимація результатів та розрахунків похибки.

На рисунках 4.9 та 4.10 наведені результати апроксимації сили стиснення та сили при робочому ході поршня.

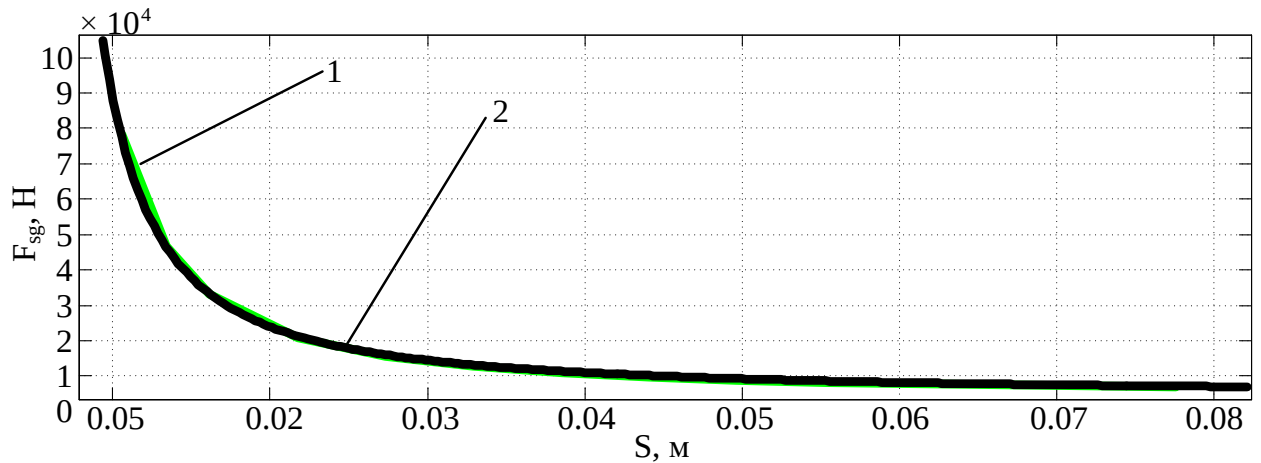


Рисунок 4.11 – Крива зміни сили стиснення: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

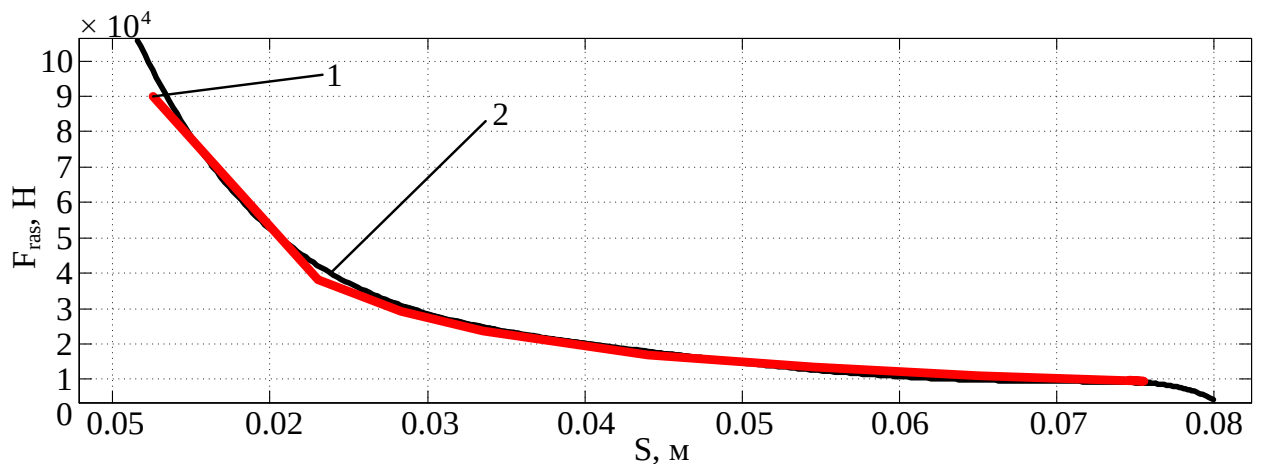


Рисунок 4.12 – Крива зміни сили при робочому ході поршня: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

Для моделювання ДВЗ необхідно знати сумарну силу, що реалізується, в залежності від кута повороту колінчастого валу. Поперечні осі кривошипів, що

утворені шатунними шийками та щоками, розташовані у двох площинах під кутом 180° між ними, через це сумарна сила буде дорівнювати сумі сил, що реалізуються кожним поршнем, зі зсувом на кут 180° . Сила, що реалізується поршнем при робочому ході, є позитивною, сила стискання, всмоктування та викиду газів є негативними.

На основі визначених вище залежностей сили ДВЗ від кута повороту колінчастого валу розроблена імітаційна модель роботи ДВЗ, що наведена на рисунку 4.11.

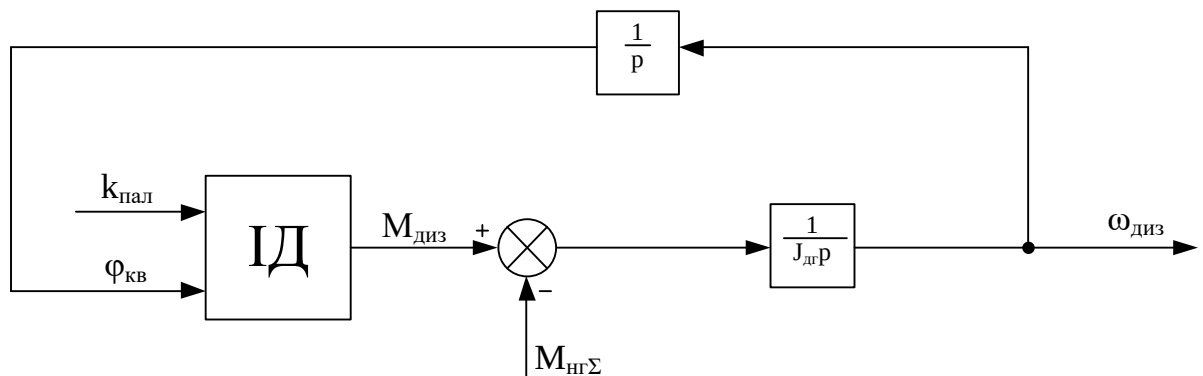


Рисунок 4.13 – Структурна схема імітаційної моделі роботи чотиритактного бензинового двигуна A14SMS

Блок ІД, в залежності від кута повороту колінчастого валу та кількості палива, що розрахована регулятором кількості обертів двигуна, що є ПІ-регулятором, визначає силу, яка реалізується двигуном. Отримане значення сили перетворюється у обертовий момент на валу двигуна, що передається до колесам.

Розроблена модель ДВЗ дозволяє більш точно змоделювати характер роботи автомобіля у перехідних процесах.

4.2 Дослідження роботи автомобіля на імітаційній моделі

Доповнивши, раніше отриману модель автомобіля моделлю ДВЗ, отримуємо узагальнену імітаційну модель роботи автомобіля Daewoo Lanos (рисунок 4.12).

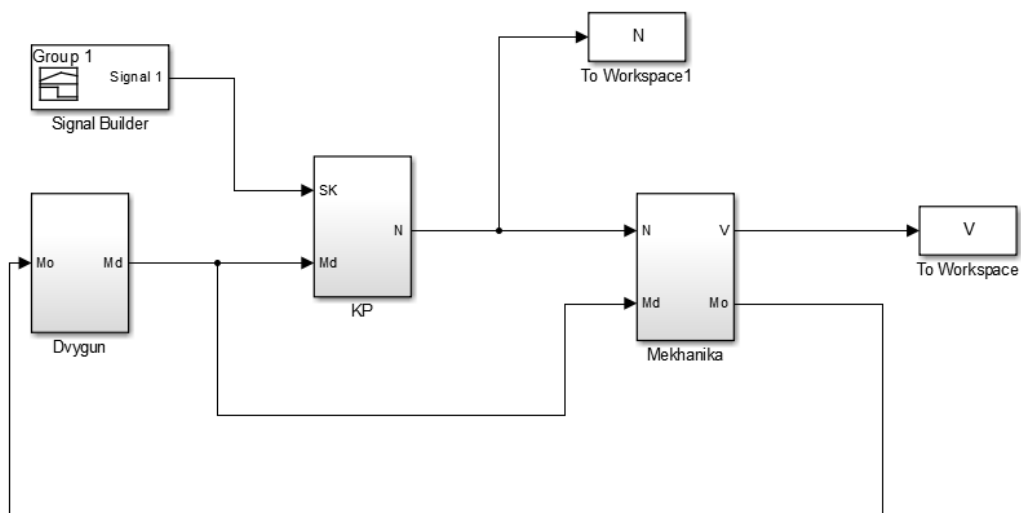


Рисунок 4.14 – Узагальнена імітаційна модель роботи автомобіля Daewoo Lanos

При дослідженні роботи автомобіля на імітаційній моделі для дослідження перехідних процесів та динамічних властивостей системи відбувалась ступенева зміна ухилу шляху (0, +3, +1).

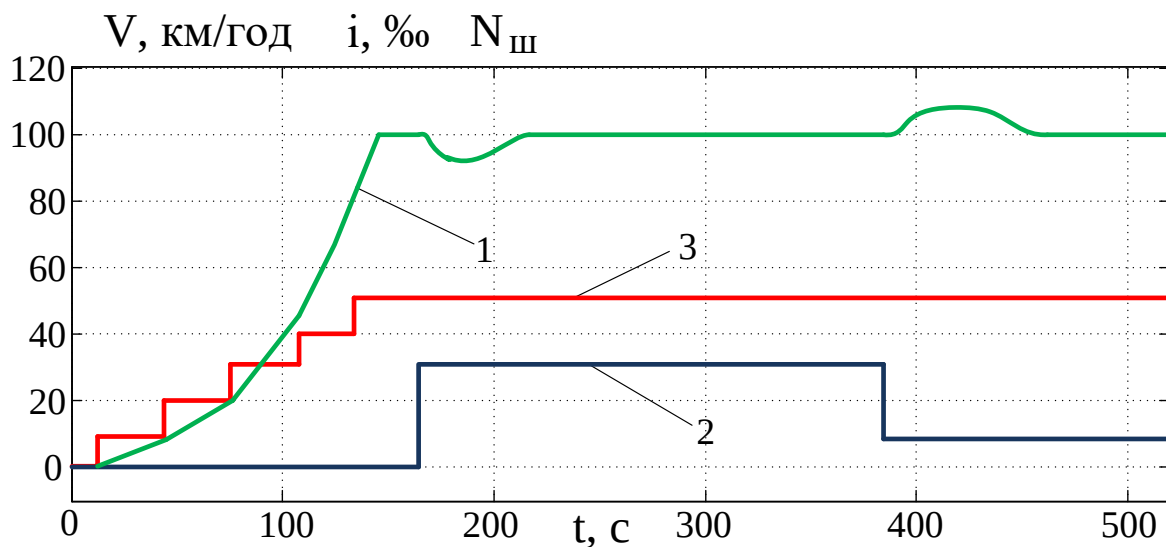


Рисунок 4.15 – Результати імітаційного моделювання

Результатами моделювання є отримані графіки: 1 – швидкості, 2 – номери ступені передачі та 3 – ухилу профілю шляху.

Під час зміни профілю відбувалась зміна швидкості руху автомобіля через велику інерційність роботи системи з ДВЗ.

5 Моделювання роботи електромобіля на базі Daewoo Lanos

5.1 Імітаційне моделювання акумуляторної батареї

У якості накопичувача енергії на електромобілі застосована акумуляторна батарея LT-LFP 130 (рисунок 5.1) При виробництві акумуляторів Ліотех використовується наноструктурований катодний матеріал літій-залізо-фосфат (LiFePO_4). Відмінність літій-залізо-фосфатних акумуляторів від інших (свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, лужних та інших):

- високий ресурс – 3000 циклів;
- низька вартість циклу – низькі експлуатаційні затрати на життєвий цикл готового виробу;
- не потребує обслуговування;
- відсутність ефекту пам'яті;
- питома потужність вище у 2-10 разів;
- висока напруга розряду;
- низький саморозряд;
- широкий температурний діапазон.



Рисунок 5.1 – Акумулятор LT-LFP 130

Основні технічні характеристики акумулятора LT-LFP 130 наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні технічні характеристики акумулятора LT-LFP 130

Параметр	Значення
Номінальна ємність, А·год.	130
Номінальна напруга, В	3,2
Питома енергія по масі, Вт.год/кг	84,5 / 140,2
Ресурс при глибині розрядки 80%, циклів	3000
Саморозряд при зберіганні, % в місяць	< 3
Робота при температурі, °С	від -40 до +50
Маса, кг	9,50

Як відомо, робота акумуляторної батареї відбувається за зарядно-розрядною характеристикою. Для обраного акумулятора розрядна та зарядна характеристики представлені на рис. 5.2 та рис. 5.3 відповідно.

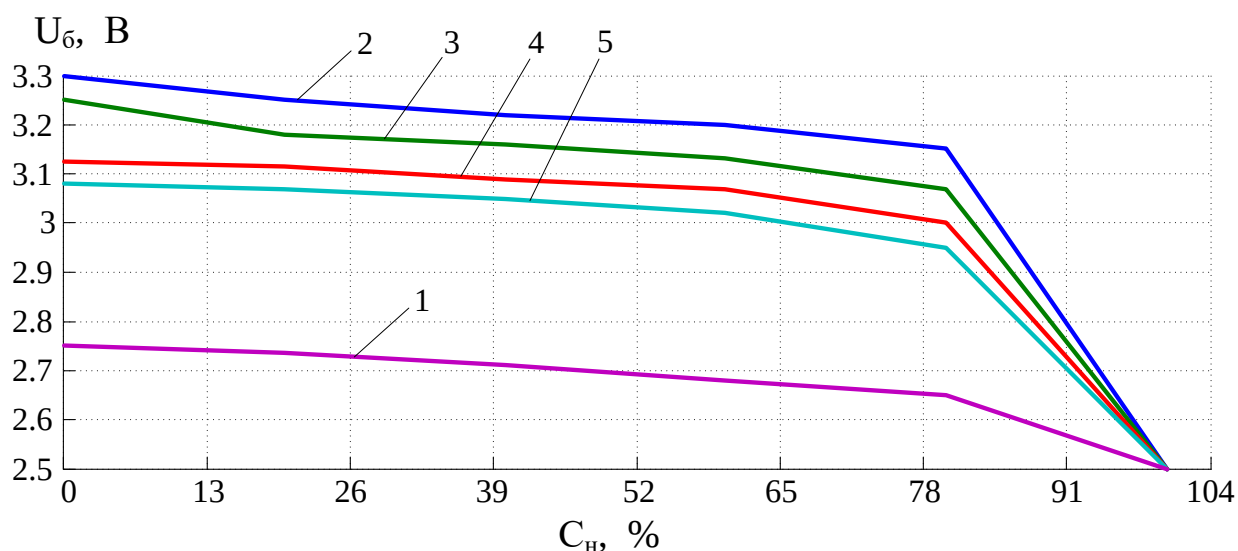


Рисунок 5.2 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LFP 130

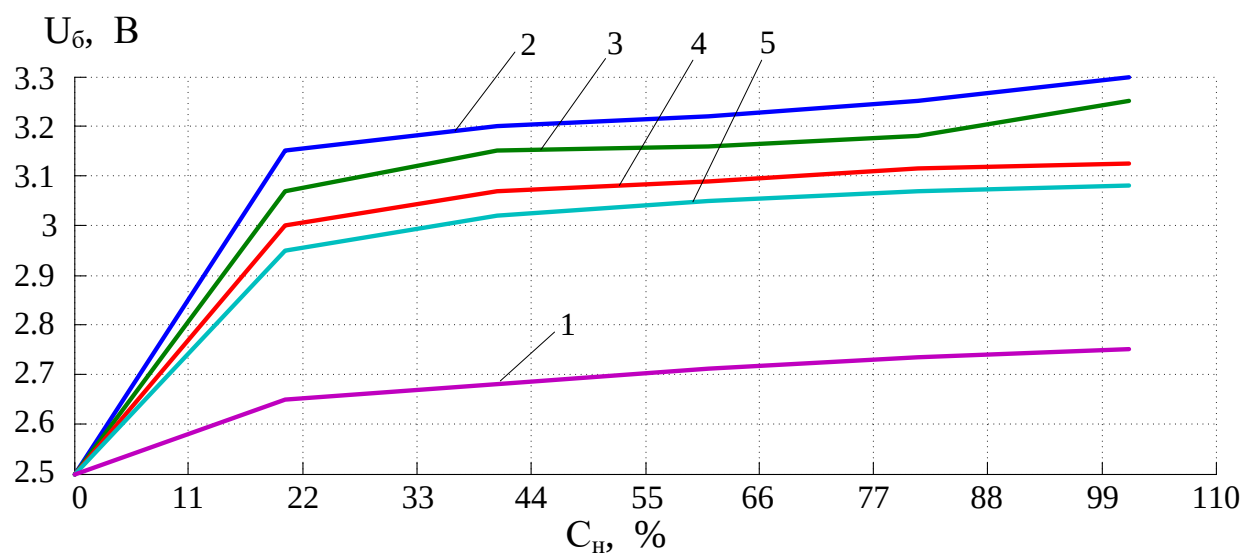


Рисунок 5.3 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 130

Значення сили струму C обраного акумулятора складає 130 А. Функціональна схема накопичувача енергії LT-LYP 130 представлена на рис. 5.4.

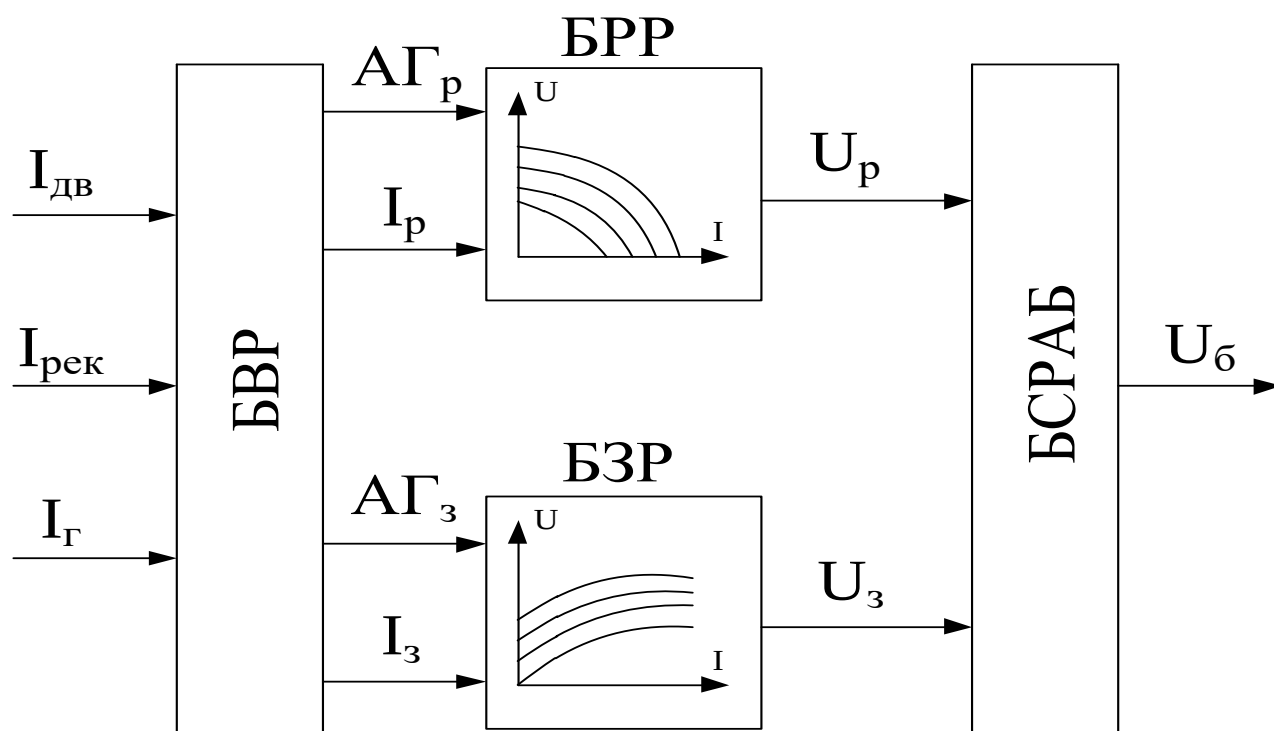


Рисунок 5.4 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

Дана функціональна схема включає в себе чотири основних блока: БВР, БРР, БЗР та БСРАБ. На вхід БВР подаються три величини струмів: струм двигуна у тяговому режимі $I_{\text{дв}}$, струм двигуна у режимі рекуперації $I_{\text{рек}}$ та зарядний струм від синхронного генератора I_z . В залежності від їх значень БВР вибирає зарядний або розрядний режим роботи АБ. БРР та БЗР відпрацьовують задані характеристики (рис. 5.2 і 5.3) та видають сигнали U_z і U_p , які відповідають певному рівню напруги АБ, що, в свою чергу, залежать від амперер-годин її роботи у режимі заряду AG_z та розряду AG_p , а також від величини розрядного I_p і зарядного I_z струмів. БСРАБ узгоджує між собою два вхідних сигнали U_z і U_p та видає результуюче значення напруги U_6 АБ.

5.2 Імітаційне моделювання асинхронного двигуна Mitsubishi i-MiEV з векторною системою керування

В якості тягового обраний асинхронний двигун з номінальною потужністю 22 кВт, що наведений на рисунку 5.5.

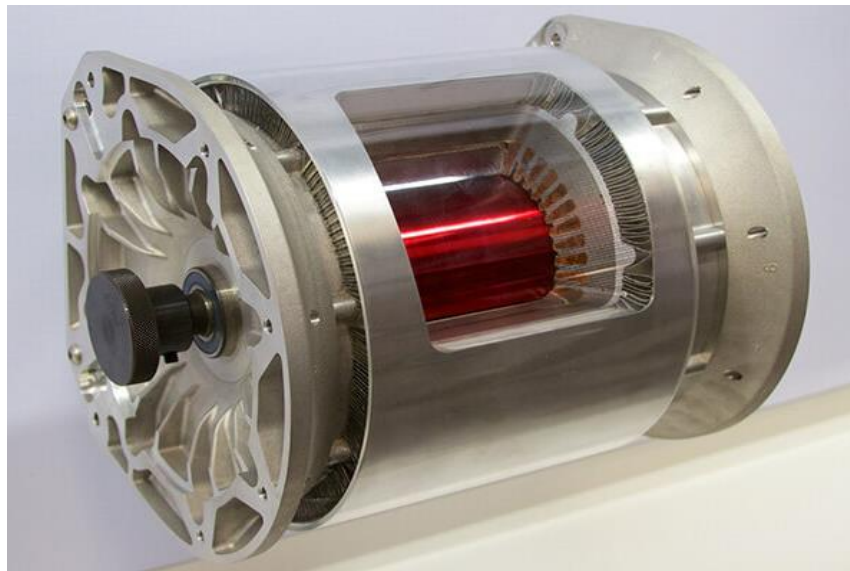


Рисунок 5.5 – Асинхронного двигуна Mitsubishi i-MiEV

Електродвигуни Mitsubishi i-MiEV призначені для застосування в технологічному обладнанні, в електромобілі, тролейбусі, дизель-електричному автобусі, трамваї, метро, гібридному автомобілі і в ліфтовому обладнанні.

Найбільш простим способом пуску двигуна з короткозамкненим ротором є включення обмотки його статора безпосередньо в мережу, на номінальну напругу обмотки статора. Такий пуск називається прямим. При цьому пусковий струм двигуна значно перевищує номінальний (у 5-7 разів). Підвищений пусковий струм становить небезпеку для самого двигуна внаслідок збільшення електродинамічних зусиль в лобових частинах обмотки статора і підвищення температури обмоток. При частих або зтяжних пусках температура обмоток може перевищити допустимі межі.

Сучасні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором проектуються з таким розрахунком, щоб вони за величиною виникають при пуску електродинамічних зусиль, що діють на обмотки, і за умовами нагріву допускали прямої пуск. Тому прямий пуск можливий, коли мережа досить потужна і пускові струми не викликають неприпустимо великих падінь напруги в мережі (не більше 10-15%).

Нормальним способом пуску двигунів з короткозамкненим ротором є прямий пуск. При невеликій інерційності виконавчого механізму частота обертання ротора двигуна швидко досягає сталого значення і пусковий струм також швидко спадає, не викликаючи перегріву обмотки статора. Якщо за умовами падіння напруги в мережі прямий пуск двигуна з короткозамкненим ротором неможливий, застосовуються різні способи пуску двигуна при зниженій напрузі. Однак при цьому пропорційно квадрату напруги на затискачах обмотки статора або квадрату пускового струму двигуна знижується пусковий момент, що є недоліком пуску при зниженій напрузі.

За допомоги підпрограми, написаної в середовищі Matlab по параметрам двигуна будуємо його механічну характеристику (рисунок 3.1).

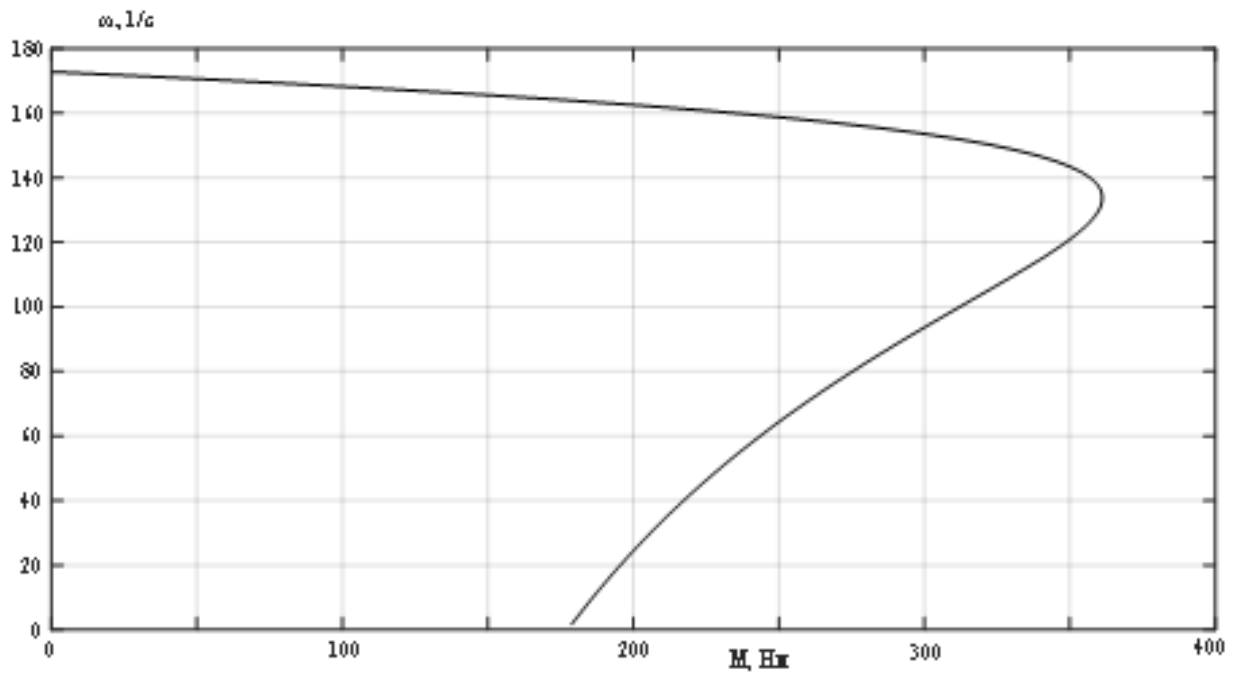


Рисунок 5.6 – Механічна характеристика двигуна

Для дослідження прямого пуску розглянемо імітаційну модель двигуна у координатах d-q(рисунок 5.7).

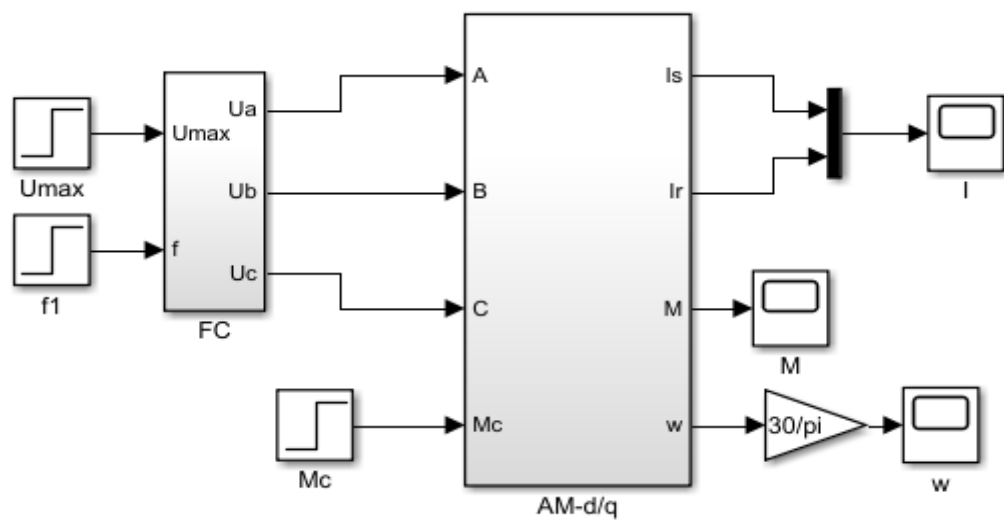


Рисунок 5.7 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в координатах d-q

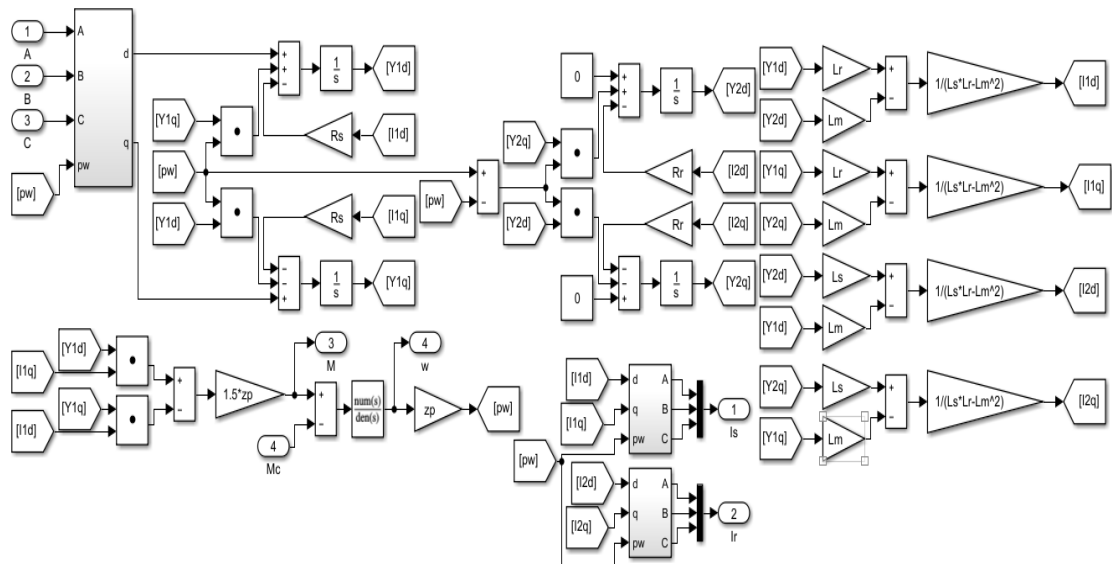


Рисунок 5.8 – Підсистема АМ-d/q

У результаті моделювання прямого пуску були отримані характеристики струму, електромагнітного моменту та швидкості обертання двигуна (рисунки 5.9-5.10).

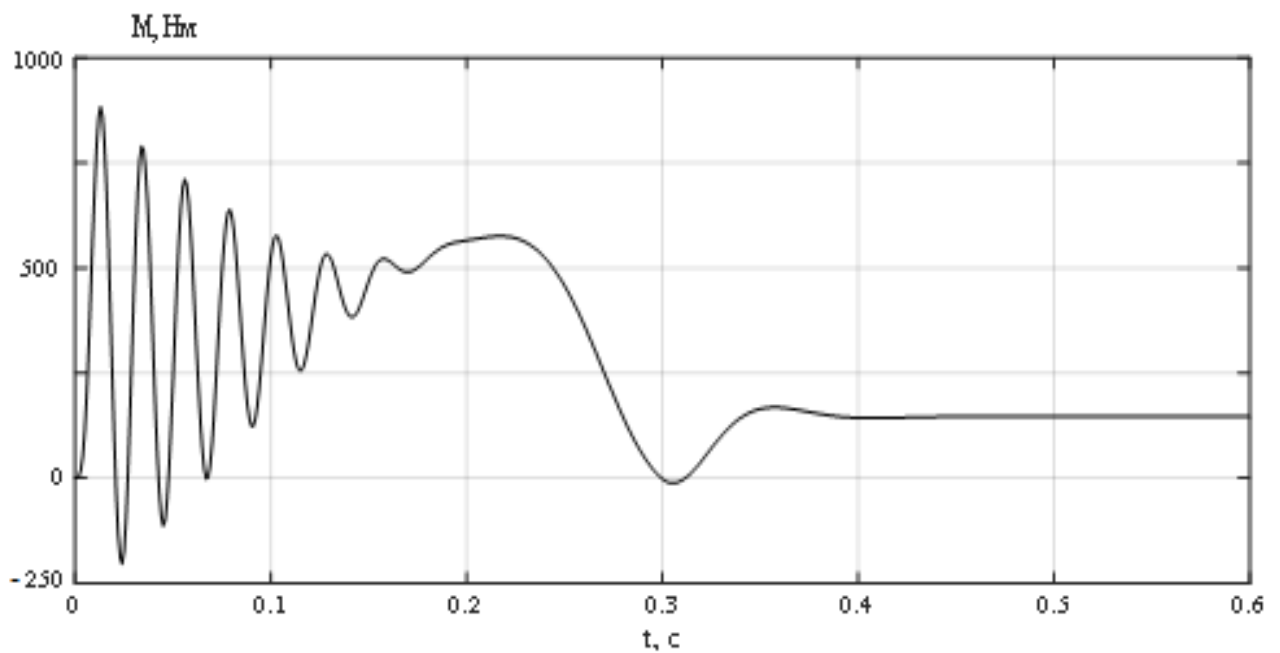


Рисунок 5.9 – Характеристика електромагнітного моменту при прямому пуску

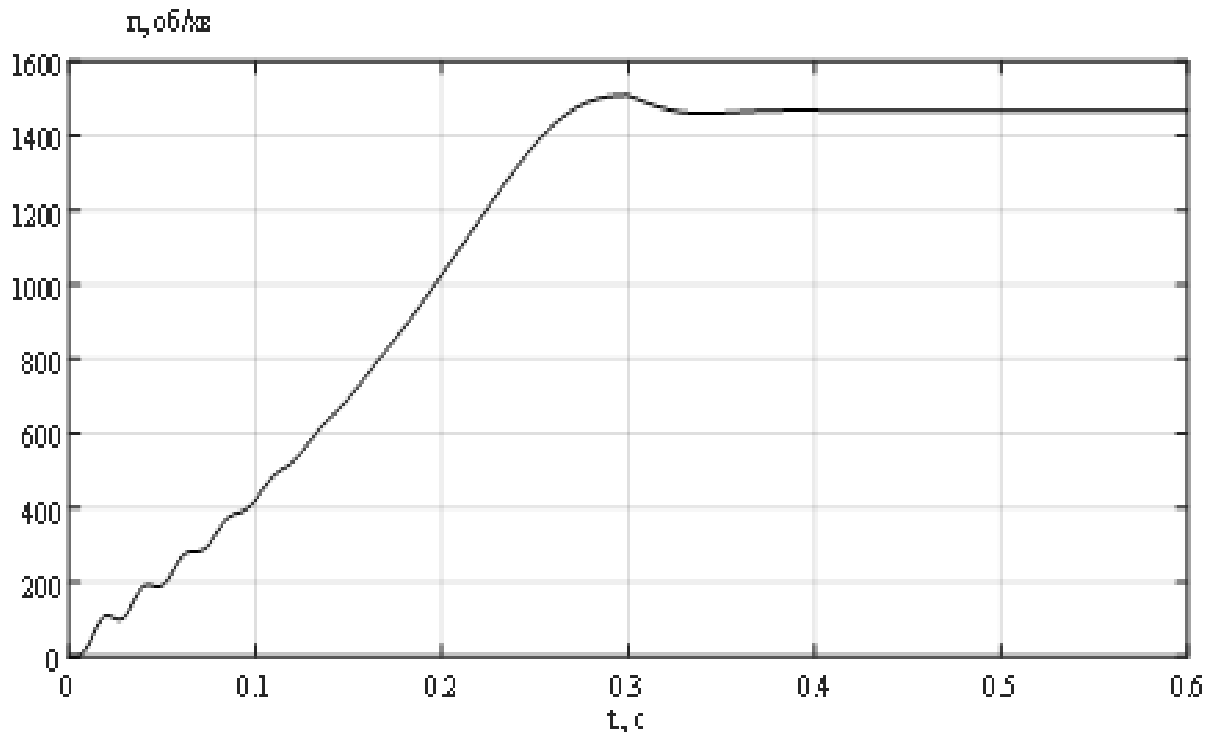


Рисунок 5.10 – Характеристика швидкості двигуна при прямому пуску

Живлення електричних машин змінного струму із змінною швидкістю обертання здійснюється від пристроїв, що забезпечують на своєму виході регульовану частоту напруги або струму. При застосуванні напівпровідникової техніки напівпровідникові прилади повинні вмикатися і вимикатися в певній послідовності, формуючи вихідну напруга (струм). Раніше в якості таких приладів використовувалися тиристори. Як відомо, закрити вже відкритий тиристор можна тільки подавши на його анод негативну (по відношенню до катода) напругу. Для цих цілей використались вузли штучної комутації, що складаються, як правило, з тиристорів, конденсаторів, діодів і дроселів. Їх наявність знижувало надійність перетворювачів, збільшувало їх габарити і вартість.

Ситуація радикально змінилася в зв'язку з появою IGBT - транзисторів (Insulated Gate Bipolar Transistor) - пристроїв, які можна закрити по ланцюгу управління. IGBT має біполярний транзистор на виході і польовий на вході. Перший забезпечує високі допустимі струм і напругу, а другий - малі струми управління. У корпус IGBT вбудований зворотний діод (рисунок 3.7), який забезпечує при необхідності шлях протікання струму зворотної полярності.

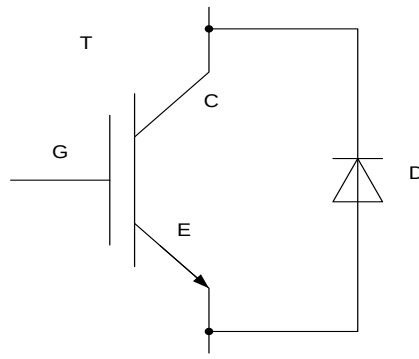


Рисунок 5.11 – IGBT-транзистор

Для управління IGBT необхідно, як правило, перетворити логічний сигнал управління в напругу, придатної для управління IGBT. Це здійснюється за допомогою Спеціальних пристроїв, званих драйверами, якими зазвичай виробники IGBT комплектують свої поставки. Крім зазначеної, драйвери вирішують такі задачі: трансформаторне або оптичне потенційне розділення кіл управління і силових, захист IGBT від перевантажень і коротких замикань, обмеження швидкості наростання анодного струму, реалізацію необхідних затримок при включенні - виключенні IGBT в одній фазі інвертора (для виключення наскрізних струмів необхідно спочатку вимкнути транзистор, що виходить з роботи, а потім включити вступає в роботу, ця затримка становить кілька мксек.), індикація стану драйвера і транзистора. Можлива блок-схема драйвера приведена на рисунку 5.12.

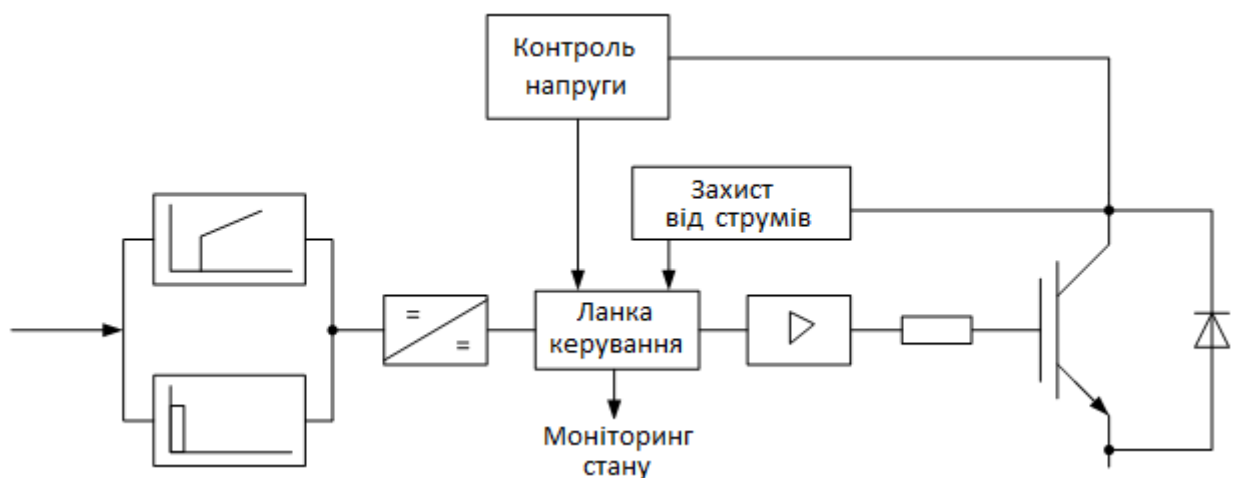


Рисунок 5.12 – Схема драйвера

Основним видом перетворювача, який живить регульований по швидкості асинхронний двигун, є інвертор напруги (рисунок 5.13), який складається з трьох частин: джерела постійної напруги, ланки постійного струму і власне інвертора.

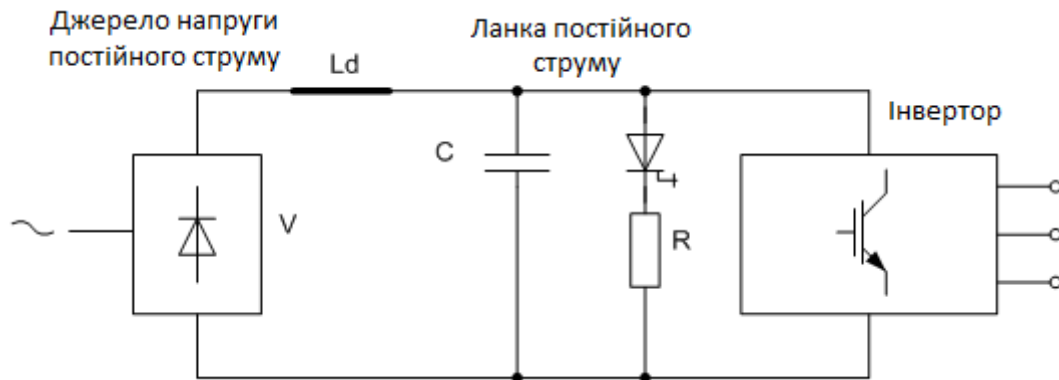


Рисунок 5.13 – Структурна схема інвертора напруги

У якості джерела постійної напруги використовується однофазний мостовий двухнапівперіодний випрямляч (рисунок 5.14).

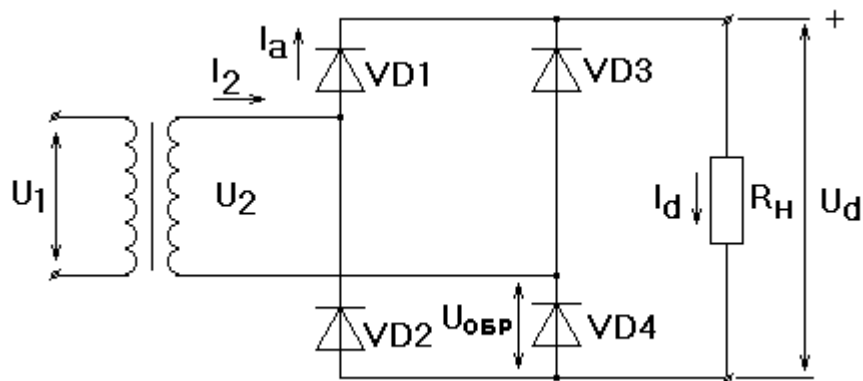


Рисунок 5.14 – Нерегульований вхідний випрямляч

Індуктивність L обмежує аварійний струм установки і швидкість його наростання, зменшує спотворення мережі живлення. Напруга на конденсаторі C дорівнює в середньому $1,35U_c$, де U_c - діюче значення лінійного напруги живлення.

Ланка постійного струму складається з дроселя L_d , конденсатора C і ланцюги напівпровідниковий ключ-резистор R , необхідний для гасіння гальмівної енергії двигуна і захисту конденсатора від перенапруги. Індуктивність L_d в ланцюзі

постійного струму служить для зменшення зарядного струму конденсатор-тора і зменшення пульсацій струму.

Величина ємності конденсатора повинна забезпечити:

1 Суттєве зменшення рівня пульсацій напруги U_d , викликаних комутаційними процесами в інверторі і випрямлячі. Так як частота цих процесів досить велика, то необхідна для цього ємність конденсатора виявляється невеликою.

2 При аварійному процесі в інверторі всі ключі закриваються і енергія, накопичена в індуктивності двигуна, розряджається на конденсаторі, збільшуючи його напругу.

3 В перехідних процесах скидання і накинування навантаження і перехід двигуна в генераторний режим напруга на конденсаторі не повинно змінюватися більш, ніж на 15% від встановленого значення.

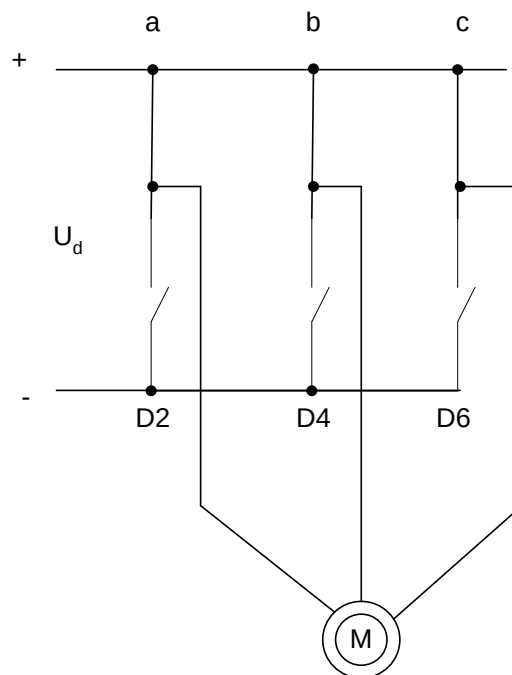


Рисунок 5.15 – Інвертор напруги

Останню частину схеми рисунка 5.13 становить власне інвертор. Простий (або дворівневий) інвертор зображений на рисунку 5.15. Кожен умовно позначений ключ являє собою IGBT. При нормальній роботі в кожній фазі один з ключів

замкнутий, а другий розімкнути. Прийнятий стан інвертора позначають трирозрядним двійковим кодом, в якому розряд «0» відповідає розімкненому стану ключа відповідної фази, під'єданого до шини «+» (і відповідно замкнутому станом ключа в цій фазі, приєданого до шини «-») , а «1» - протилежному стану ключів.

Обраний перетворювач частоти являє собою автономний інвертор напруги (АІН) і містить ємність в ланці постійного струму (силовий фільтр). У АІН має місце однозначна залежність напруги в ланці постійно струму від напруги на навантаженні, і тому він є джерелом напруги. Завдяки наявності ємності, при роботі інвертора як джерела напруги на активно-індуктивне навантаження, яким є АД, забезпечується обмін реактивної енергією між АД і ланкою постійного струму. Перетворювач готовий до роботи після заряду конденсатора проміжного контуру. Побудований з IGBT-модулів інвертор виробляє з постійної напруги проміжного контуру трифазні напруги для живлення двигунів. Крім конденсатора для цієї мети необхідні обернені діоди, включені паралельно основним ключам. Через ці діоди протікає струм в моменти повернення реактивної енергії від двигуна в ємність. Струм в ланцюзі на ділянці між інвертором і ємністю при низьких $\cos\varphi$ навантаження може змінювати напрям. Форма напруги на виході інвертора визначається порядком перемикання ключів. Напруга на виході інвертора регулюється широтно-імпульсним способом, який здійснюється модуляцією напруги несучої частоти ω_k (частоти комутації ключів) сигналом основної частоти.

5.2 Математичне моделювання асинхронного електропривода з векторною системою керування

АД має трифазну обмотку на статорі і короткозамкненим обмотку на роторі. Його принцип дії заснований на тому, що обертається магнітне поле статора, перетинаючи провідники обмотки ротора, наводить в них напруги-ня, що викликає протікання струму в обмотці ротора. Взаємодія цього струму з потоком статора створює електромагнітний момент, що приводить ротор в обертання. З цього

видно, що для створення моменту, що обертає ротор, необхідно, щоб електрична частота (швидкість) обертання ротора ω_r була би менше частоти обертання магнітного потоку статора ω_s , причому $\omega_r = Z_p \omega$, де ω - механічна швидкість обертання ротора, Z_p - число пар полюсів двигуна. Величина $\Delta\omega = \omega_s - \omega_r$ називається абсолютним ковзанням двигуна, а величина $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_{sb}$ - відносним ковзанням, де ω_{sb} - номінальна електрична частота живлення статора (зазвичай $\omega_{sb} = 314 \text{ c}^{-1}$).

Схема заміщення двигуна зображена на рисунку 5.6.

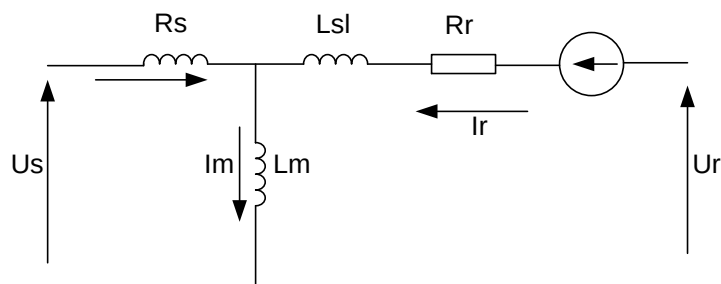


Рисунок 5.16 – Схема заміщення АД

АД являє собою нелінійний багатовимірний об'єкт з досить складною структурою. При його математичному описі велике значення має коректність прийнятих в кожному конкретному випадку припущень. Різноманітність математичних моделей АД пов'язано з вмістом зроблених припущень, з системою координат, в яких виконано математичний опис, з вмістом вхідних і вихідних сигналів моделі і з системою прийнятих відносних величин.

Залежно від прийнятої системи координат розроблені наступні моделі АД:

- моделі АД в трифазній системі координат;
- моделі АД в двофазних ортогональних системах координат;
- однофазні моделі на підставі статичних характеристик АД з спрощеним урахуванням електромагнітних процесів (на підставі схеми заміщення АД в сталому режимі).

Вибір системи координат і конфігурації моделі, тобто складу вхідних і вихідних сигналів, залежить від структури системи управління, зокрема, від складу

сигналів, за допомогою яких організовуються зворотні зв'язки, і від особливостей джерела живлення двигуна.

Вдалий вибір математичної моделі є важливим не тільки при аналізі, а й при синтезі системи автоматичного управління. Саме розробка моделі в системі координат, орієнтованої по потокозчепленню ротора, стала основою створення високоякісних систем векторного керування.

Для переходу від математичного опису гармонійних сигналів в багатофазових координатах до математичного опису в ортогональних двофазних координатах використовується поняття узагальненого вектора.

Узагальненим називають такий вектор, проекції якого на осі фаз рівні миттєвим значенням відповідних фазних величин в заданий момент часу.

Для виконання цього формулювання узагальнений вектор при вугіллі поворота φ_k повинен обертатися проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю

$$\omega_v = \frac{d\varphi_v}{dt}, \quad (5.1)$$

яка збігається з кутовою швидкістю відповідного періодичного сигналу і мати модуль, який дорівнює максимальному значенню фазної величини

$$|\tilde{V}| = V_{\max}. \quad (5.2)$$

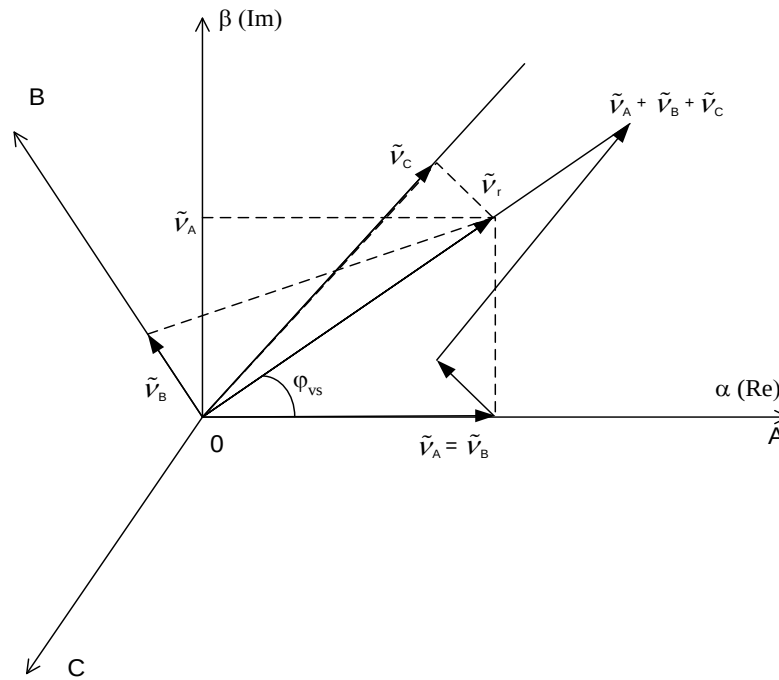


Рисунок 5.17 – Узагальнений вектор і його складові

На рисунку 5.7 зображено узагальнений вектор будь-якої фізичної величини ротора, його проекції на фізичні осі векторна сума цих проекцій і проекції узагальненого вектора на дійсну d (Re) і уявну q (Im) осі, перша з яких (v_d) збігається з віссю a , а друга (v_q) - розташована перпендикулярно до першої і повернута на кут 90° проти годинникової стрілки.

Сума векторів представляє собою вектор, який збігається з узагальненим вектором по напрямку і перевищує його амплітуду в 1,5 рази. З урахуванням цього можна записати:

$$\tilde{v}_{r_{abc}} = 1,5(\tilde{v}_A + \tilde{v}_B + \tilde{v}_C) = 1,5(\tilde{v}_a + \tilde{v}_b e^{j2\pi/3} + \tilde{v}_c e^{j4\pi/3}) = \frac{2}{3} a v_r, \quad (5.3)$$

$$\tilde{v}_{r_{abc}} = \tilde{v}_{r_{dq}} = v_{r_{max}} r^{j\varphi_{vr}} = v_{r_{max}} (\cos\varphi_{vr} + j\sin\varphi_{vr}) = v_d + jv_q, \quad (5.4)$$

$$\text{де } a = [1 \bar{a} a^2]; \quad \bar{a} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \bar{a}^2 = e^{j4\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\mathbf{v}_r = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\tilde{v}_a| \\ |\tilde{v}_b| \\ |\tilde{v}_c| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{r\max} \cos(\varphi_{vr}(t)) \\ v_{r\max} \cos(\varphi_{vr}(t) - 2\pi/3) \\ v_{r\max} \cos(\varphi_{vr}(t) - 4\pi/3) \end{bmatrix},$$

а φ_{vr} – кут між напрямком узагальненого вектору ротора та віссю:

$$\frac{d\varphi_{vr}}{dt} = \omega_{vr} - Z_p \omega.$$

Таким чином, формули (3.3) і (3.4) описують узагальнений вектор ротора в трифазній (abc) та ортогональній (dq) системах координат, які обертаються зі швидкістю

$$\omega_r = Z_p \omega, \quad \frac{d\varphi_{vr}}{dt} = \omega_r.$$

Для того, щоб напрямок дійсної осі ортогональної системи координат збігалося з напрямком узагальненого вектору потокозчеплення ротора ψ_r , взятого за основу, система координат повинна обертатися синхронно з цим вектором. При цьому вектор потокозчеплення ротора в ній буде мати тільки дійсну складову, так як проекція цього вектору на уявну вісь q дорівнюватиме нулю. Тоді умови математичного опису АД в цих координатах матимуть вигляд

$$\omega_k = \omega_{\psi_r}, \quad (5.5)$$

$$\Psi_{rq} = 0; \quad \Psi_{rd} = |\tilde{\Psi}_r| = \Psi_r = \Psi_{rm}. \quad (5.6)$$

Модель в системі координат dq стала основою розробки системи векторного керування короткозамкненим АД. Тому на додаток до умов (5.5), (2.6) додамо умову рівності нулю напруги ротора

$$U_{rd} = U_{rq} = 0. \quad (5.7)$$

При живленні обмоток статора двигуна від джерела напруги система векторного управління має зворотні зв'язки за складовими струму статора і по потокозчеплення ротора. Тому ще однією умовою для розробки моделі АД буде наявність в ній перерахованих сигналів: i_{sd} , i_{sq} , ψ_r .

Запишемо рівняння, що описують процеси в АД, в узагальнених століттяторах з урахуванням умови (5.7):

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\Psi}_s, \\ 0 = R'_r \tilde{i}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\Psi}_r, \end{cases} \quad (5.8)$$

де ω_k - частота обертання системи координат;

ω_r - електрична частота обертання ротора;

U_s , i_s - напруга і струм статора;

R_s - опір обмотки статора;

i_r - струм обмотки ротора;

R'_r - приведений опір обмотки ротора;

Ψ_r - потокозчеплення ротора.

Для короткозамкнутого двигуна вектори відрізняються один від одного через наявність розсіювання обмоток статора і ротора. У зв'язку з цим для них можна записати:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_s &= (L_m + L_{sl}) \tilde{i}_s + L_m \tilde{i}_r; \\ \tilde{\Psi}_r &= (L_m + L_{rl}) \tilde{i}_r + L_m \tilde{i}_s, \end{aligned} \quad (5.9)$$

де L_m - головна індуктивність розсіювання;

L_{sl} , L_{rl} - індуктивність розсіювання обмоток.

При цьому для індуктивностей обмоток статора L_s і ротора L_r матимемо:

$$\begin{aligned} L_s &= L_m + L_{sl}; \\ L_r &= L_m + L_{rl}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Для того, щоб забезпечити обумовлений раніше склад сигналів моді-ли, знайдемо узагальнені вектора струму ротора і потокозчеплення статора:

$$\tilde{i}_r = \frac{1}{L_r} \tilde{\Psi}_r - \frac{L_m}{L_r} \tilde{i}_s = \frac{1}{L_r} \tilde{\Psi}_r - k_r \tilde{i}_s; \quad (5.11)$$

$$\tilde{\Psi}_s = L_s \tilde{i}_s - \frac{L_m^2}{L_r} \tilde{i}_s + \frac{L_m}{L_r} \tilde{\Psi}_r = \sigma L_s \tilde{i}_s + k_r \tilde{\Psi}_r, \quad (5.12)$$

$$\text{де } k_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}.$$

Після підстановки рівнянь (5.11), (5.12) в систему рівнянь (5.8) отримуємо:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{i}_s + \sigma L_s \frac{d\tilde{i}_s}{dt} + k_r \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j\omega_k (\sigma L_s \tilde{i}_s + k_r \tilde{\Psi}_r); \\ 0 = \frac{1}{T_r} \tilde{\Psi}_r - \frac{L_m}{T_r} \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - Z_p \omega_r) \tilde{\Psi}_r, \end{cases} \quad (5.13)$$

де електромагнітна постійна часу

$$T_r = \frac{L_r}{R_r'}.$$

Для того, щоб перше рівняння системи (5.13) мало похідну тільки від одного сигналу, виразимо похідну від потокозчеплення ротора в другому рівнянні тієї ж системи і підставимо отриманий вираз в перше:

$$\frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \tilde{i}_s - \frac{1}{T_r} \tilde{\Psi}_r - j(\omega_k - Z_p \omega_r) \tilde{\Psi}_r = k_r R'_r \tilde{i}_s - \frac{1}{T_r} \tilde{\Psi}_r - j(\omega_k - Z_p \omega_r) \tilde{\Psi}_r; \quad (5.14)$$

$$\tilde{U}_s = (R_s + k_r^2 R'_r) \tilde{i}_s + \sigma L_s \frac{d\tilde{i}_s}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \tilde{\Psi}_r + j\omega_k \sigma L_s \tilde{i}_s - jZ_p \omega k_r \tilde{\Psi}_r. \quad (5.15)$$

Перепишемо (5.14) і (5.15) з урахуванням їх проекцій на осі d і q. Отримаємо наступну систему

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} = (R_s + k_r^2 R'_r) i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_r - \omega_k \sigma L_s i_{sq}; \\ U_{sq} = (R_s + k_r^2 R'_r) i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_k \sigma L_s i_{sd} + Z_p \omega k_r \Psi_r; \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Psi_r; \\ 0 = k_r R'_r i_{sq} - (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_r. \end{array} \right. \quad (5.16)$$

Позначимо

$$R_{sr} = R_s + k_r^2 R'_r, \quad T_{sr} = \frac{\sigma L_s}{R_{sr}}$$

і перепишемо диференційне рівняння (3.16) в операторній формі:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_r + \omega_k \sigma L_s i_{sq} = i_{sd} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ U_{sq} - \omega_k \sigma L_s i_{sd} - Z_p \omega k_r \Psi_r = i_{sq} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ L_m i_{sd} = \Psi_r (T_r p + 1); \\ \omega_k = k_r R'_r \frac{i_{sq}}{\Psi_r} + Z_p \omega. \end{array} \right. \quad (5.17)$$

В останньому рівнянні системи (3.17) позначимо:

$$\omega_r = Z_p \omega, \Delta \omega_r = k_r R'_r i_{sq} / \Psi_r = \omega_k - Z_p \omega \quad (5.18)$$

- швидкість ротора і абсолютне ковзання, наведені до швидкості електромагнітного поля.

Рівняння для електромагнітного моменту двигуна представляється як:

$$M = \frac{3}{2} Z_p k_r \Psi_r i_{sq}. \quad (5.19)$$

При цьому рівняння механічної рівноваги запишеться в звичайному вигляді:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (5.20)$$

де J - приведений момент інерції електроприводу.

За отриманими вище рівнянням в пакеті Matlab складемо модель короткозамкнутого АД. Вона наведена на рисунку 5.18. Наведена структурна схема може бути використана при дослід-вання асинхронного електроприводу з системою векторного управління при управлінні по потокозчеплення ротора. Модель має два лінійних канали управління, що значно спрощує синтез передавальних функцій регуляторних-торів. При цьому в системі управління в

залежності від параметрів двигуна повинні бути компенсовані внутрішні перехресні зворотні зв'язки з впливами U_{kd} і U_{kq} .

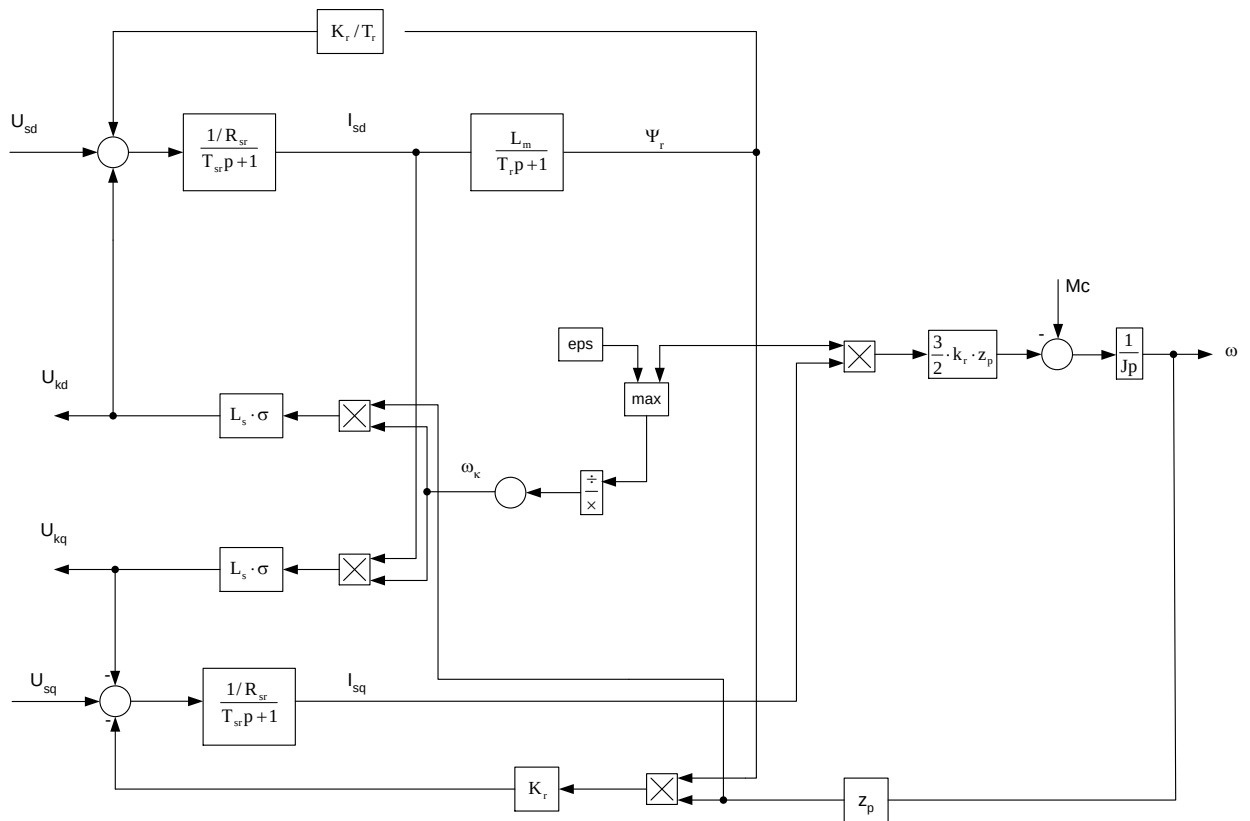


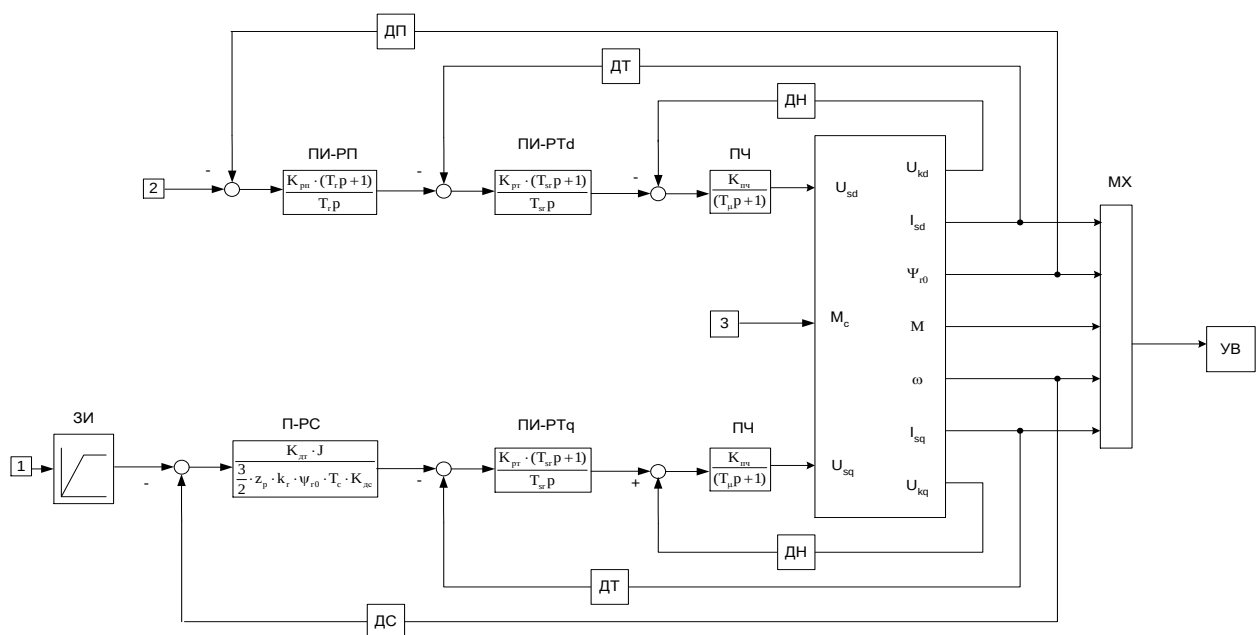
Рисунок 5.18 – Структурна схема АД з КЗ ротором в обертовій системі координат, орієнованій по потокозчепленню ротора

Система векторного керування має два канали:

- канал регулювання моменту, в якому контур регулювання активної складової струму статора i_{sq} підпорядкований контуру регулювання швидкості;
- канал регулювання потокозчеплення ротора, в якому контур регулювання реактивної складової струму статора i_{sd} підпорядкований контуру регулювання потокозчеплення Ψ_r .

Для додання системі необхідних якостей, необхідно синтезувати регулятори як в каналі регулювання (стабілізації) потоку, так і в каналі регулювання швидкості.

Сучасні системи векторного керування АД, що випускаються ведучими електротехнічними фірмами, будуються на базі програмованого мікропроцесорного управління і є цифровими. Однак вони можуть бути представлені своїм аналоговим варіантом. Структурна схема такого ЕП показана на рисунку 5.19.



На схемі рисунку 5.9 позначено:

2 - момент опору, який дорівнює номінальному моменту двигуна,

3 - сигнал завдання потокозчеплення ротора $U_{\psi r0} = 10\text{В}$.

Перетворювач частоти у вигляді АІН будемо представляти, як реальна аперіодична ланка.

Малу некомпенсированное постійну часу перетворювача ча-простоти (ПЧ) приймаємо рівною $T_\mu = 0,002$ с. Таким чином, передавальна функція ПЧ матиме вигляд:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_\mu p + 1} \quad (5.21)$$

де $K_{пч} = 234$ - коефіцієнт посилення перетворювача по напрузі.

Визначимо передавальні функції регуляторів. Принцип підлеглого регулювання заснований на тому, що всі регулятори повинні компенсувати постійні часу, наявні в об'єкті регулювання. Крім того, в коефіцієнтах посилення регуляторів необхідно врахувати всі коефіцієнти посилення об'єкта.

У каналі регулювання швидкості вибираємо пропорційний регулятор швидкості (РС), а в каналі регулювання потоку - пропорційно-інтегральний регулятор потоку ψ_r (РП).

Налаштування на модульний оптимум (МО) внутрішніх струмових контурів забезпечується пропорційно-інтегральними (ПІ) - регуляторами со-складових струму i_{sd} і i_{sq} ПІ-РТd, ПІ-РТq з передавальної функцією:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{рт}(T_{sr}p + 1)}{T_{sr}p} \quad (5.22)$$

де - коефіцієнт підсилення регулятора струму, який визначається за формулою:

$$K_{рт} = \frac{T_{sr}}{K_{от} \cdot T_\tau} \quad (5.23)$$

де $K_{от}$ - коефіцієнт посилення об'єкту регулювання РТ;

$T_\tau = 2 \cdot T_\mu = 0,004$ с - постійна часу контуру струму;

$$K_{от} = K_{пч} \cdot K_{дт} \cdot \frac{1}{R_{sr}} \quad (5.24)$$

де $K_{дт}$ - коефіцієнт передачі датчика струму;

$$K_{дт} = \frac{10}{2,5 \cdot 142} = 0,028$$

$$K_{от} = 137 \cdot 0,028 \cdot \frac{1}{0,78} = 8,37$$

Такі регулятори активного і реактивного струму повністю компенсують інерційність об'єкта управління і мають ідентичні передавальні функції.

Для забезпечення стабілізації потоку (тобто підтримки його на постійному рівні) синтезується ПІ-регулятор потоку. Передавальна функція якого буде мати вигляд:

$$W_{пп}(p) = \frac{K_{пп}(T_r p + 1)}{T_r p} \quad (5.25)$$

де - коефіцієнт підсилення регулятора потоку, який визначається за формулою:

$$K_{пп} = \frac{T_r}{K_{оп} \cdot T_{п}} \quad (5.26)$$

де $K_{оп}$ - коефіцієнт підсилення об'єкта керування РП.

$T_{п} = 2 \cdot T_r = 0,008\text{с}$ – постійна часу контуру потокозчеплення.

Коефіцієнт підсилення $K_{оп}$ визначається як:

$$K_{оп} = K_T \cdot K_{дп} \cdot L_m \quad (5.27)$$

де $K_T = \frac{1}{K_{дт}}$ - коефіцієнт підсилення оптимізованого токового контуру;

$K_{дп}$ - коефіцієнт передачі датчика потокозчеплення ротора.

$$K_T = \frac{1}{0,028} = 35,5$$

Коефіцієнт $K_{дп}$ - визначається як:

$$K_{дп} = \frac{10}{\Psi_{г0}} \quad (5.28)$$

$$K_{дп} = \frac{10}{4,16} = 2,4$$

Таким чином отримуємо:

$$K_{оп} = 35,5 \cdot 2,4 \cdot 0,035 = 2,98$$

$$K_{рп} = \frac{0,113}{2,98 \cdot 0,008} = 4,76$$

Канал регулювання потоку являється астатичним першого порядку, таким чином в ньому буде відсутня помилка по задаючому сигналу.

Для налаштування контуру швидкості можуть бути взяті як ПІ-, так і П-регулятори швидкості. Для ПІ-регулятора швидкості передавальна функція буде мати вигляд:

$$W_{рс} = \frac{K_{рс}(T_{\mu}p+1)}{T_{\mu}p} \quad (5.29)$$

$$K_{pc} = \frac{K_{дг} \cdot J}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_r \cdot \psi_{r0} \cdot T_c \cdot K_{дс}} \quad (5.30)$$

де $T_c = 2 \cdot T_r = 0,008$ - постійна часу контуру швидкості, с.

Коефіцієнт підсилення датчика швидкості розраховується з умови за-дання величини керуючого напруги в каналі регулювання швидкості. Приймається $U_{зс} = 10$ В. Виходячи з цього визначається коефіцієнт посилення зворотного зв'язку за швидкістю:

$$K_{дс} = \frac{10}{\omega_n} \quad (5.31)$$

$$K_{дс} = \frac{10}{155} = 0,058$$

Тоді отримуємо коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$K_{pc} = \frac{0,028 \cdot 15}{\frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 0,93 \cdot 4,16 \cdot 0,008 \cdot 0,058} = 77$$

Канал регулювання швидкості є однократноінтегруючим. Таким чином, в системі при набиранні навантаження є просадка швидкості (статична помилка).

Завдання на вхід системи подається через задатчик інтенсивності (ЗІ). Постійна часу ЗІ $T_{зи}$ розраховується за співвідношенням, с:

$$T_{зи} = \frac{J \cdot \omega_n}{0,8 \cdot M_n} \quad (5.32)$$

де M_n - номінальний момент двигуна, Н·м:

$$T_{зи} = \frac{15 \cdot 155}{0,8 \cdot 2919} = 0,7$$

Пуск від ЗІ здійснюється для можливості забезпечення постійного прискорення, а також для уникнення інтенсивних коливань моменту і струму, які будуть спостерігатися при прямому пуску.

Завдання на систему подається з затримкою 0,06 с. Це необхідно для того, щоб потік в двигуні вийшов на номінальне значення.

В об'єкті управління (АД) є перехресні зв'язки, які спричиняють істотний вплив на динаміку ЕП. У перехідних режимах спостерігається значна коливальність і просадка швидкості. Отже, ці зв'язки необхідно компенсувати. Для цього сигнали U_{kd} і U_{kq} подаються на вхід ланок, що описують перетворювач частоти в каналі реактивного і в каналі активного струмів відповідно.

За допомогою перетворювачів координат, які складають виконай тільки частина системи, з обертової системи координат dq в нерухому $\alpha\beta$ і з двофазної $\alpha\beta$ в трифазну А, В, С можна отримати реальні струми в фазах двигуна.

Перетворення з обертової системи координат dq в нерухому $\alpha\beta$ можна реалізувати на підставі рівняння:

$$\bar{V}_{dq} = \bar{V} = \bar{V}_{\alpha\beta} e^{-j\gamma_k} \quad (5.33)$$

Перетворення з обертової системи координат dq в нерухому $\alpha\beta$ можна реалізувати на підставі рівняння:

$$\begin{cases} v_A = v_\alpha; \\ v_B = -\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta; \\ v_C = -\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta. \end{cases} \quad (5.34)$$

В результаті моделювання АД з векторним керуванням були отримані наступні характеристики (рисунок 5.20):

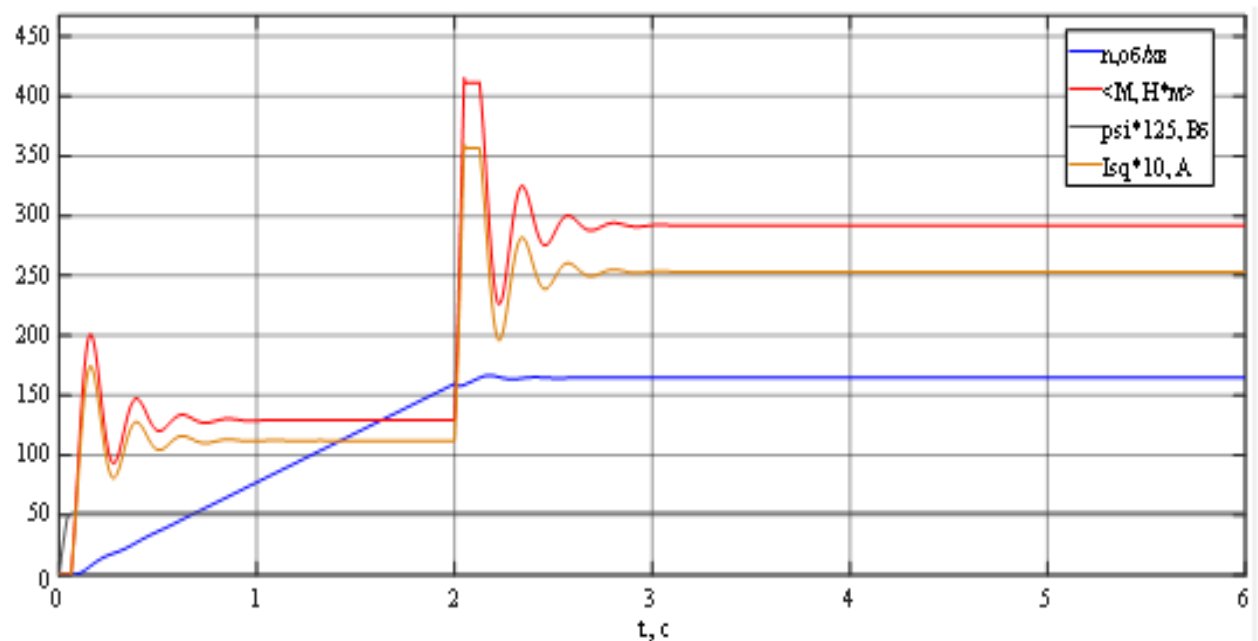


Рисунок 5.20–Характеристики двигуна при векторному керуванні при номінальному моменту

З даного графіка видно, що двигун починає розганятися без навантаження, а на другій секунді прикладається номінальний момент опору. Також на графіку зображений електромагнітний момент двигуна та струм, який регулює його. Крім цього, показане потокозчеплення ротора, яке підтримується на постійному рівні весь період роботи двигуна. Оскільки струм та потокозчеплення мають значно менші значення, порівняно з іншими параметрами, то для зображення на одному графіку їх необхідно масштабувати (у 10 та 125 разів відповідно).

На рисунках 5.21 та 5.22 зображені характеристики АД при різних швидкостях та моментах опору.

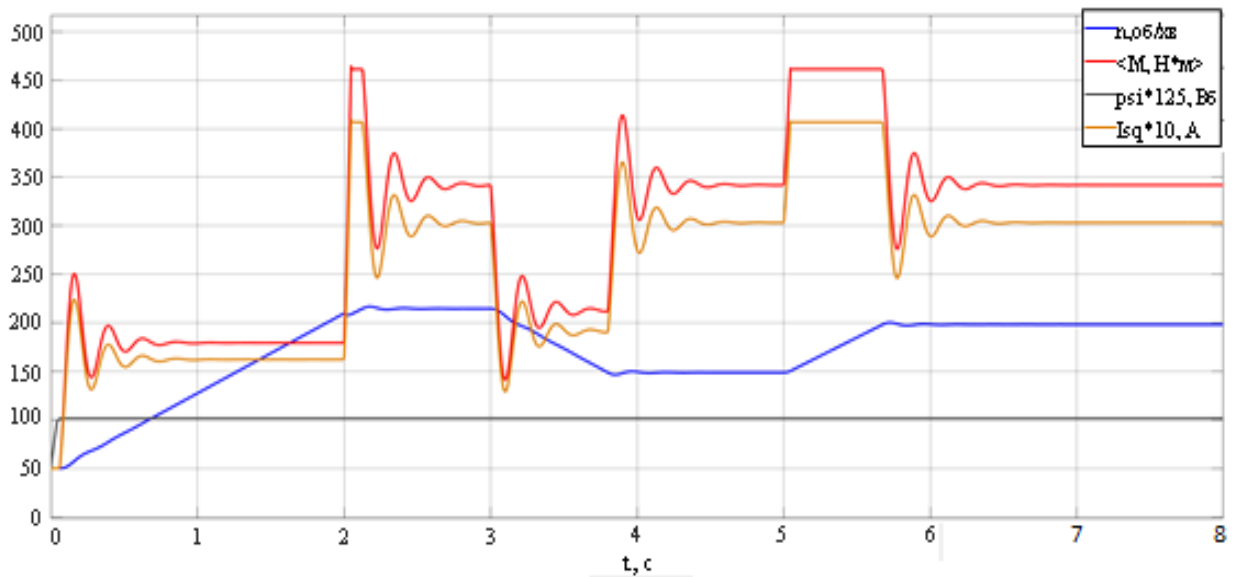


Рисунок 5.21 - Характеристики двигуна при векторному керуванні при завданні різних швидкостей обертання

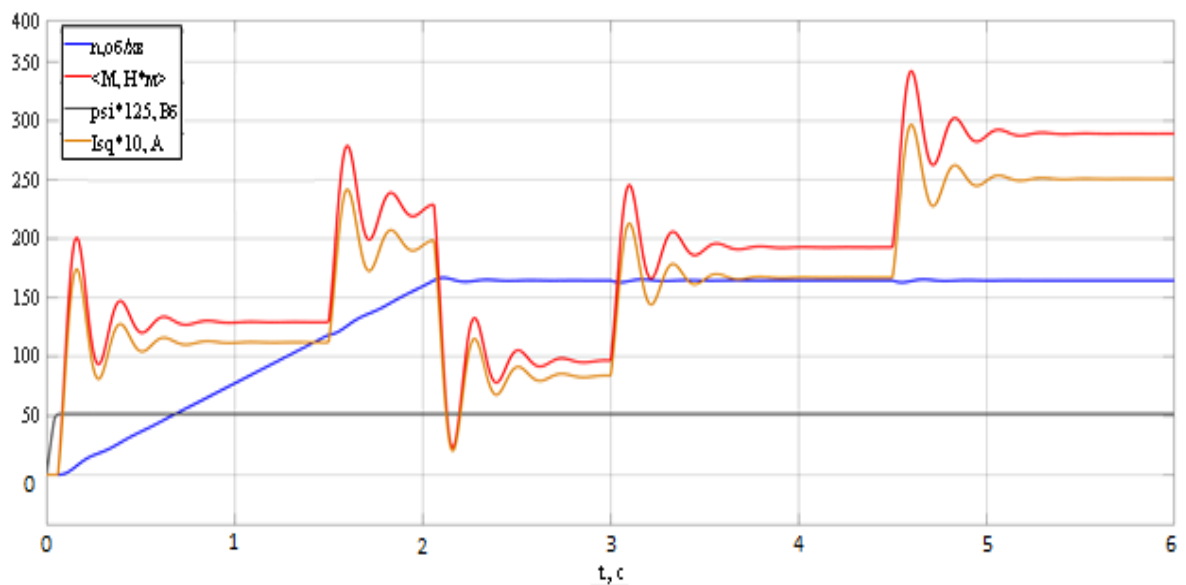


Рисунок 5.22 - Характеристики двигуна при векторному керуванні при різних моментах опору

5.3 Імітаційне моделювання роботи електромобіля з асинхронним тяговим електроприводом

Узагальнена імітаційна модель роботи електромобіля з вентиляно-індукторним електроприводом представлена на рисунку 5.23.

Тестування роботи моделі виконувалось за тих самих умов, що й для автомобіля з ДВЗ, тобто зі ступеневою зміною профілю шляху (0, +3, +1). Результатами імітаційного моделювання є отримані графіки швидкості руху, номера швидкості (позиції), профілю шляху та струму двигуна. Результати моделювання наведені на рисунку 5.21.

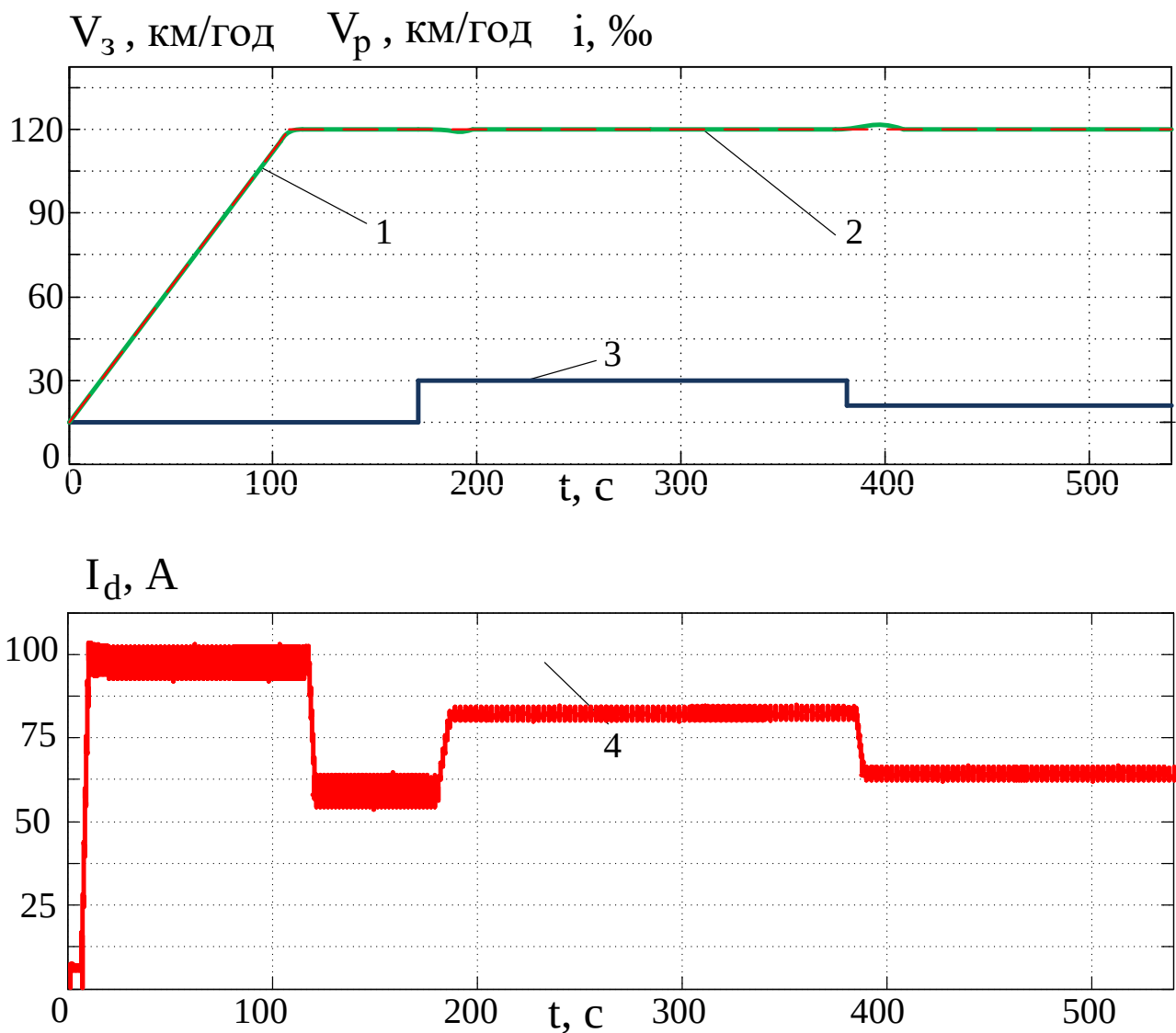


Рисунок 5.21 – Результати імітаційного моделювання

Як видно з наведених осцилограм, запровадження векторного керування дозволило прибрати просадки за швидкістю при зміні профілю шляху, крім того підвищились динамічні властивості системи, що виражаються малим часом регулювання.

6 Економічна частина

6.1 Коротка характеристика запропонованих технічних рішень.

В даному розділі розраховується економічний ефект від впровадження електричного автомобіля на заміну базового з ДВЗ. Пропонується встановити асинхронний електропривод, який включає в себе декілька елементів, а саме електричний двигун, блок акумуляторних батарей, електронний комутатор та редуктор. Також для підзарядки знадобиться зарядна станція.

Для модернізації вибраний автомобіль Daewoo Lanos, модернізований буде мати назву Daewoo LanosE. Технічні характеристики представлені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Техніко-економічна характеристика запропонованих технічних рішень

Показник	Daewoo Lanos	Daewoo Lanos E
Потужність, кВт	56,63	22
Максимальна швидкість, км/год	172	172
Запас ходу, км	648	346

Модернізація включає в себе демонтаж бензинової енергетичної установки, трансмісії, паливного баку, та монтаж електричної установки електричного двигуна з редуктором, акумуляторної батареї, перетворювача.

Існуючий бензиновий автомобіль:

Переваги: запас ходу, максимальна швидкість, заправка паливом в рази швидше та зручніше.

Недоліки: висока ціна палива, якість палива, ненадійність автомобіля, ціна обслуговування, кількість обслуговувань, більша кількість та затрати на витратні рідини (мастило, тосол), змащувальні матеріали, ДВЗ слабший на старті та початковому розгоні, малий ККД ДВЗ, велика кількість обладнання займає місце,

викиди вуглекислого газу в атмосферу, проникнення мікро-частинок вуглекислого газу у салон, вплив на здоров'я (шум, вібрація, головні болі, проблеми з нервовою системою та дихальними шляхами).

Пропонований електромобіль:

Переваги: дешевизна палива, якість електроенергії вища в порівнянні з бензином та дизелем, економія в пробках, можливість використання рекуперативного гальмування, більша надійність автомобіля (сам електричний двигун та набагато менша кількість деталей), дешевший в обслуговуванні і менша кількість ремонтів, відсутність витратних рідин, високий ККД електричного двигуна та всієї системи, немає викиду вуглекислого газу в атмосферу, позитивно до здоров'я (менший шум в салоні, немає вібрації від мотору, менші головні болі та проблеми з нервовою системою, не доводиться дихати частками вуглекислого газу), більш моментний двигун кращий на старті та початковому розгоні.

Недоліки: менший запас ходу, час зарядки, установка якісного екранування для усунення впливу електромагнітного поля на організм пасажирів.

Метою застосування модернізації автомобіля і очікуваним економічним ефектом є зниження експлуатаційних витрат за рахунок застосування більш дешевої енергії і зменшенні витрат на технічні обслуговування.

6.2 Стисла методика розрахунку економічного ефекту

Сумарний за роками розрахункового періоду економічний ефект (E_T) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів заходу модернізації за розрахунковий період (P_T) над вартісною оцінкою сукупних витрат на модернізацію за розрахунковий період ($З_T$)

$$E_T = P_T - З_T, \quad (6.1)$$

При розрахунку економічного ефекту проводиться обов'язкове приведення різночасових витрат і результатів до єдиного для всіх варіантів реалізації заходу науково-технічного прогресу (НТП) моменту часу - розрахункового року t_p . Приведення різночасових витрат і результатів всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт дисконтування α_t що визначається за формулою

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - t}, \quad (6.2)$$

де E_n – норма дисконту, приймаємо $E_n = 0,1$;

t_p – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року

6.3 Визначення одноразових витрат

До одноразових витрат відносять: витрати на придбання, доставку, демонтаж, монтаж, налаштування устаткування як автомобіля так і пристроїв його енергозабезпечення.

Витрати на придбання необхідного устаткування для зручності зведемо до таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Вартість устаткування для модернізації автомобіля

Обладнання	Одиниці виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн	Вартість доставки	Вартість монтажу	Загальна вартість
Модуль акумуляторної батареї на основі LT-LFP 130	шт	10	4300	2860	4740	50600
Зарядна станція	шт	1	27600	2300	5400	35300
Електричний двигун	шт	1	72000	5000	5400	82400
Перетворювач	шт	1	58000	4500	4500	67000
Головний редуктор	шт	1	17600	1200	1430	20230
Разом						255530

6.4 Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Визначаю річні експлуатаційні витрати при використанні базового варіанта автомобіля .

Розрахунок річних витрат на ТО бензинового автомобіля зведено в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Річні витрати за видами ТО автомобіля з ДВЗ

Вид ТО	Собівартість одиниці ТО, грн	Кількість ТО на рік, од.	Річні витрати на ТО, грн
ТО-1	650	12	7800
ТО-2	2130	2	4560
СТО	10500	0,5	5250
Разом:			17610

Здійсненням ТО займається бригада сервісного центру. Витрати на оплату їхньої праці включено до собівартості одиниці ТО. Річні витрати на технічне обслуговування бензинового автомобіля склали 17610 грн.

Визначимо річні витрати на бензин за формулою:

$$З_{\Pi}^{\text{Д}} = P^{\text{Д}} \cdot Ц_{\Pi}, \quad (6.3)$$

де $P^{\text{Д}}$ – кількість спожитого палива за рік,

$Ц_{\Pi}$ – ціна бензину А-95 за 1 літр,

$Ц_{\Pi} = 60$ грн/л.

.

Річний пробіг автомобіля визначається за формулою:

$$\sum NS_{\text{річ}} = L \cdot T, \quad (6.4)$$

де $\sum NS_{\text{річ}}$ – річний пробіг автомобіля, км;

L – середня протяжність маршруту за добу, 50 км;

T – число днів у році, $T = 365$ дн.

$$\sum NS_{\text{річ}} = 50 \cdot 365 = 18250 \text{ км}$$

Оскільки витрати палива автомобілем складають 8,4 л/100км, визначимо кількість спожитого палива за рік:

$$P^{\text{Д}} = \frac{\sum NS_{\text{річ}} \cdot C_{\text{рб}}}{100}, \quad (6.6)$$

де $C_{\text{рб}}$ – середня витрата палива на 100 км,

$C_{\text{рб}} = 8,8$ л/100км.

$$P^D = \frac{18250 \cdot 8,8}{100} = 1606 \text{ л}$$

$$З^D = 1606 \cdot 60 = 96360 \text{ грн}$$

Загальні річні експлуатаційні витрати для базового варіанта автомобіля складуть:

$$I_t^D = 96360 + 17610 = 113970 \text{ грн}$$

Визначаю річні експлуатаційні витрати для нового автомобіля.

Розрахунок витрат на ТО модернізованого автомобіля за видами ТО подано в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4—Річні витрати за видами ТО автомобіля на електричній тязі

Вид ТО	Собівартість одиниці ТО, грн	Кількість ТО на рік, од	Річні витрати на ТО, грн
ТО-1	650	12	7800
ТО-2	450	2	900
СТО	5030	0,5	2515
Разом:			11215

Визначимо річні витрати на електричну енергію

$$З_E^E = P^E \cdot Ц_E, \quad (6.7)$$

де $Ц_E = 4 \text{ грн/кВт*год}$

Експериментальним шляхом було отримано витрату електричної енергії на рівні 15,3 кВт/год. Припустимо що в день в тяговому режимі він проїжджає 2 години.

$$P^E = 15,3 \cdot 2 \cdot 365 = 11169 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

$$З^E = 11169 \cdot 4 = 44676 \text{ грн}$$

Загальні річні експлуатаційні витрати для електричного варіанта автомобіля складуть:

$$I_t^D = 44676 + 11215 = 55891 \text{ грн}$$

Таблиця 6.5 – Розрахунок суми витрат за весь експлуатаційний період на бензиновий автомобіль, грн.

Період	Капітальні вкладення, грн	Поточні річні витрати, грн.		Сума витрат, грн
		паливо	обслуговування	
2024				
2025		96360	17610	113970
2026		96360	17610	113970
2027		96360	17610	113970
2028		96360	17610	113970
2029		96360	17610	113970
2030		96360	17610	113970
2031		96360	17610	113970
2032		96360	17610	113970
2033		96360	17610	113970
2034		96360	17610	113970
Разом		963600	176100	1139700

Таблиця 6.6 – Розрахунок суми витрат за весь експлуатаційний період на електричний автомобіль, грн

Роки	Капітальні вкладення, грн	Поточні річні витрати, грн.		Сума витрат, грн
		Енергія	Обслуговування	
2024	255530			255530
2025		44676	11215	55891
2026		44676	11215	55891
2027		44676	11215	55891
2028		44676	11215	55891
2029		44676	11215	55891
2030		44676	11215	55891
2031		44676	11215	55891
2032		44676	11215	55891
2033		44676	11215	55891
2034		44676	11215	55891
Разом	255530	446760	112150	814440

Загальна річна економія витрат складе

$$\Delta E_{\text{річ}}^{\text{заг}} = 113970 - 55891 = 58079 \text{ грн}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюється у табличній формі (таблиця 6.7).

Таблиця 6.7 – Розрахунок економічного ефекту за роками експлуатації

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Капітальні вкладення K_t , тис.грн	305,5									
Економія поточних витрат ΔC_t , тис. грн	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1
Економічний ефект E_t , тис.грн	-197,4	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1
Коефіцієнт приведення α_t	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513	0,467	0,424	0,386
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	-224,9	48,0	43,7	39,7	36,1	32,8	29,8	27,1	24,6	22,4
Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \dots + E_k$ тис.грн	-224,9	-176,9	-133,2	-93,6	-57,5	-24,7	5,1	32,2	56,9	79,3

Висновок: завдяки впровадженню електромобіля було виявлено, що витрати на ТО знизились на 36%, витрати на живлення – на 54%. А отже і собівартість поїздки зменшилась. Капітальні вкладення окупляться вже через 7 років. За 10 років експлуатації економічний ефект складе 79300 грн.

Список використаних джерел

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
2. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
3. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування: Підручник., – Л.: Львівська політехніка, 2012. - 280 с
4. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування: курс лекцій (частина перша) – К.: НУХТ, 2004 –124 с.
5. Основи електроприводу: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Синявський, В.В. Савченко; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К. 2010.
6. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
7. Electrical Drives. Principles-Planning-Applications-Solutions. Jens Weidauer, Richard Messer / Siemens, 2015, англійською мовою.
8. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: Навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношайка, М.Я. Островерхов. – К.: 2020.
- 9 Сенько, В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Елементна база електронних пристроїв. [Текст]: Підручник у 4-х томах / В.І. Сенько, за ред. В. І. Сенька. Т.1. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
- 10 Банєв, Є.Ф. Енергоресурсозберігаючий електропривод ескалатора метрополітена [Текст]: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Є.Ф. Банєв. Харків, 2013. – 140 с.
- 11 Чорний, О.П. Моделювання електромеханічних систем [Текст] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. – 376 с.
- 12 Приймак, Б.І. Нечітке керування електротехнічними об'єктами [Текст] / Б.І. Приймак, М.М. Бондаренко, О.М. Халімовський // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №10. – С. 308-311.

Додаток А
Ілюстраційний матеріал

Розробка електроприводу електромобіля та дослідження режимів його роботи



Розробив:
студент групи 214-ЕЕ-Д23
Олексій ЮРЧАК
Керівник:
к.т.н., доц. Андрій МАСЛІЙ

- Дослідження існуючих схем та конструкційних рішень у галузі електромобілебудування;
- Розробка імітаційної моделі автомобіля Daewoo Lanos та дослідження його роботи;
- Розробка імітаційної моделі роботи електромобіля на базі асинхронного приводу;
- Синтез регулятора швидкості на основі векторного керування та дослідження роботи асинхронного приводу з таким типом регулятора на імітаційній моделі;
- Економічне обґрунтування доцільності модернізації автомобіля.

Аналіз історії розвитку та сучасних схем електромобілів

3



Рисунок 1 – Електромобіль "La Jamais Contente"



Рисунок 2 – Електромобіль Уолтера Бейкера

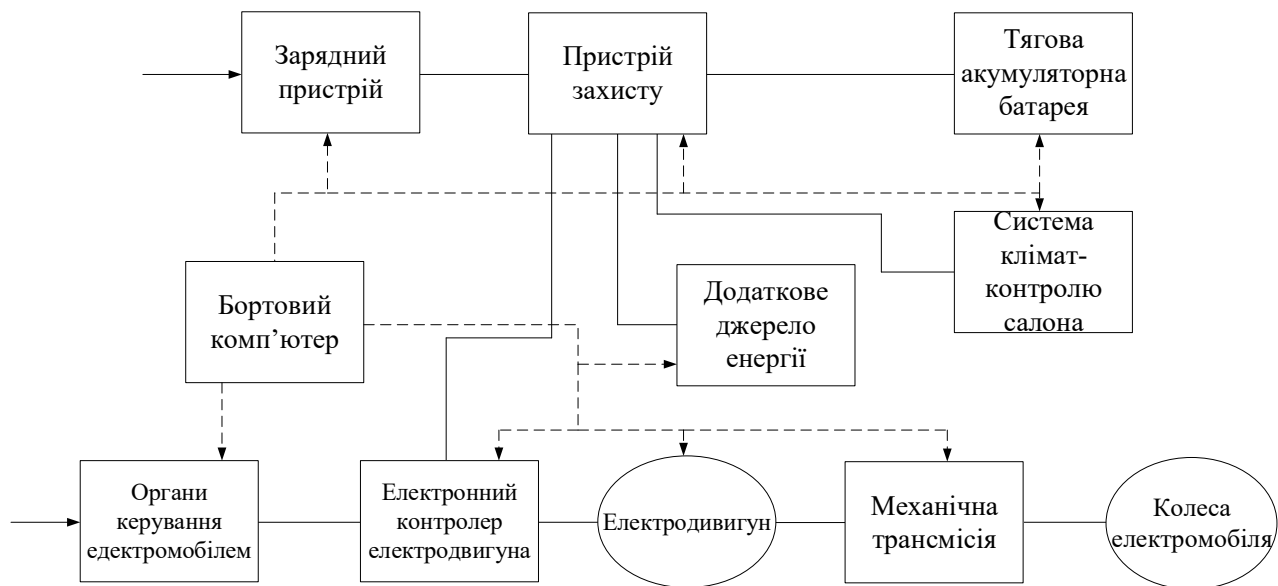


Рисунок 3 – Блок-схема електромобіля



Рисунок 4 – Сучасний електромобіль Tesla Model 3

Імітаційне моделювання роботи автомобіля 4

Daewoo Lanos

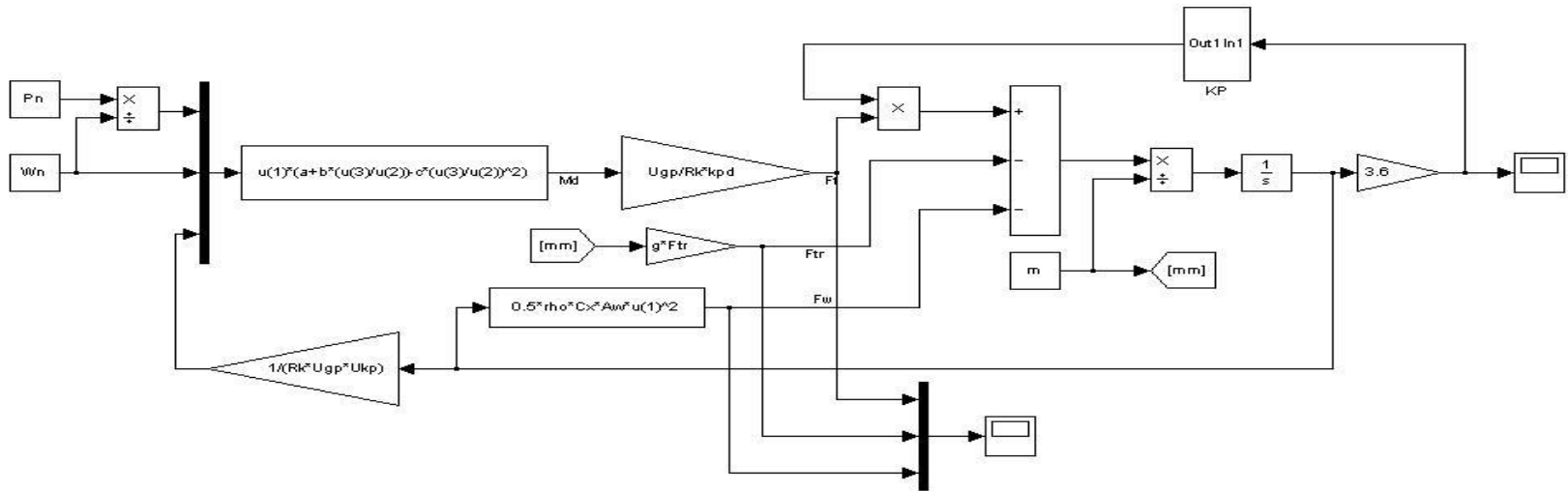


Рисунок 1 – Імітаційна модель автомобіля Daewoo Lanos

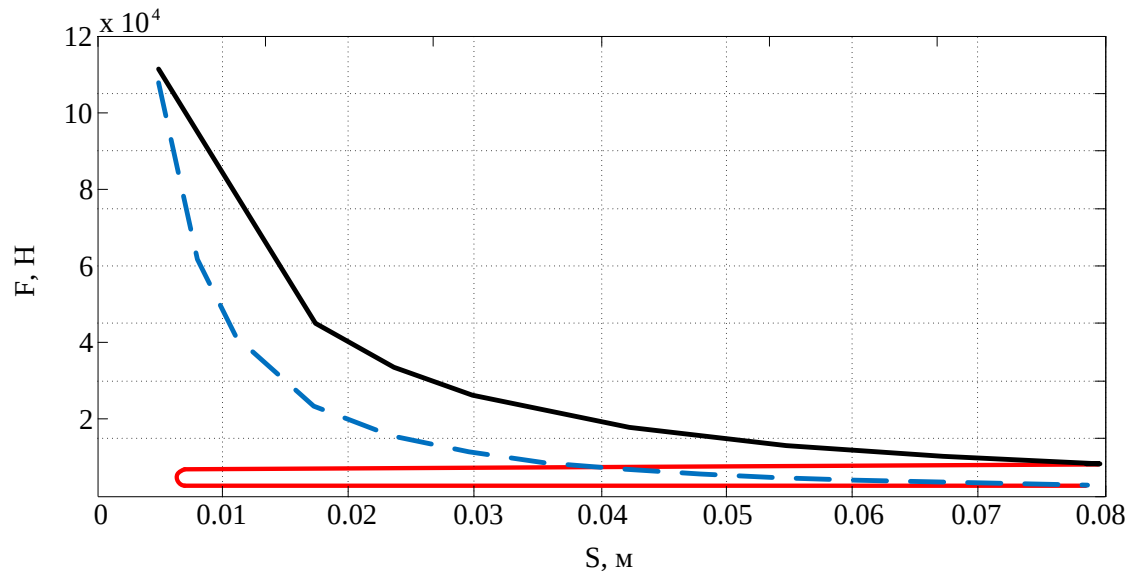


Рисунок 2 – Діаграма роботи бензинового двигуна A14SMS

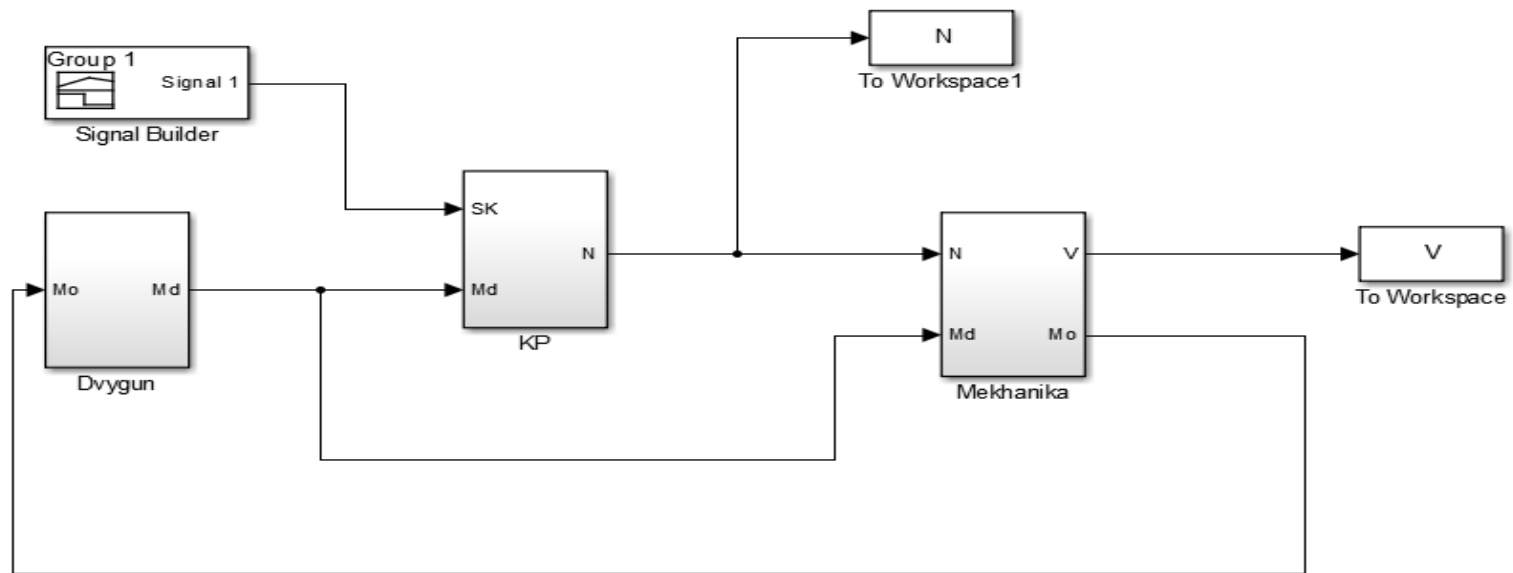


Рисунок 1 – Узагальнена імітаційна модель роботи автомобіля Daewoo Lanos

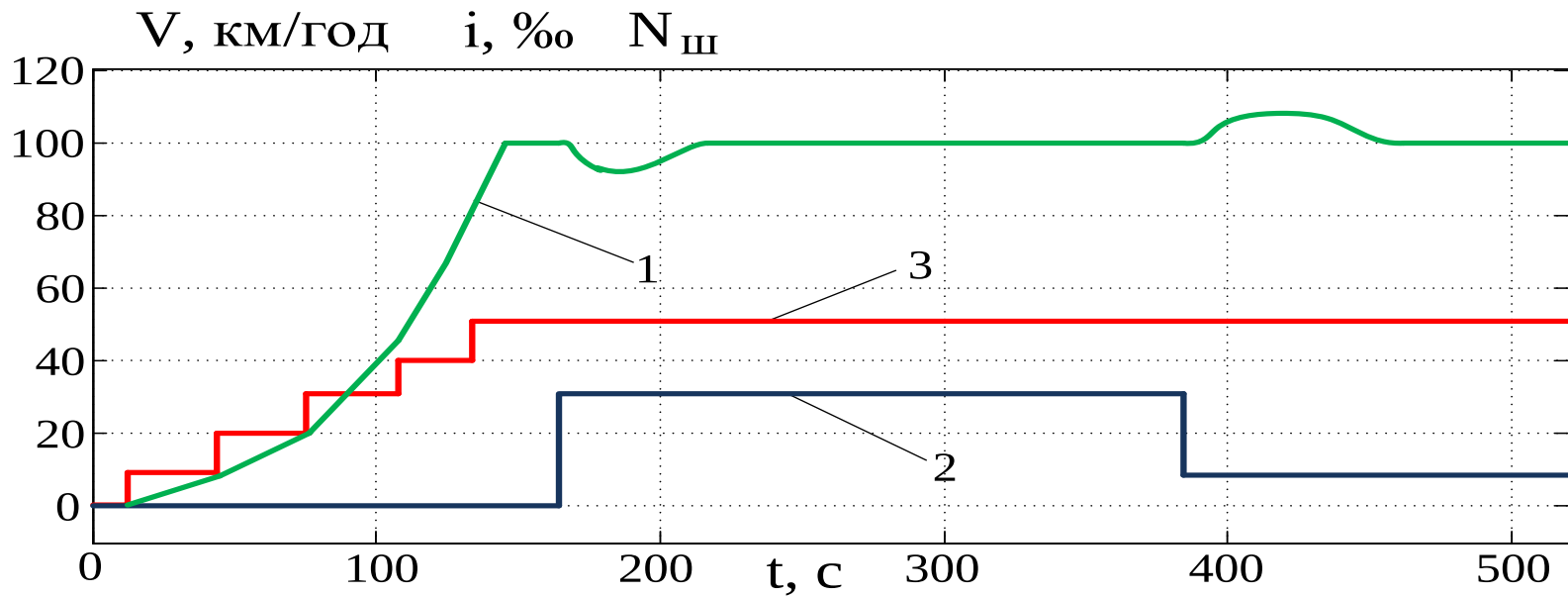


Рисунок 2 – Результати імітаційного моделювання

Моделювання роботи акумуляторної батареї 6



Рисунок 1 – Акумулятор LT-LFP 130

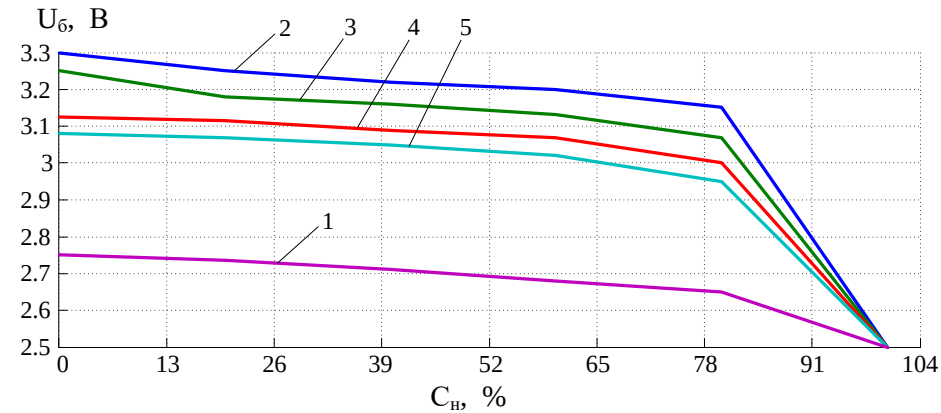


Рисунок 3 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 130

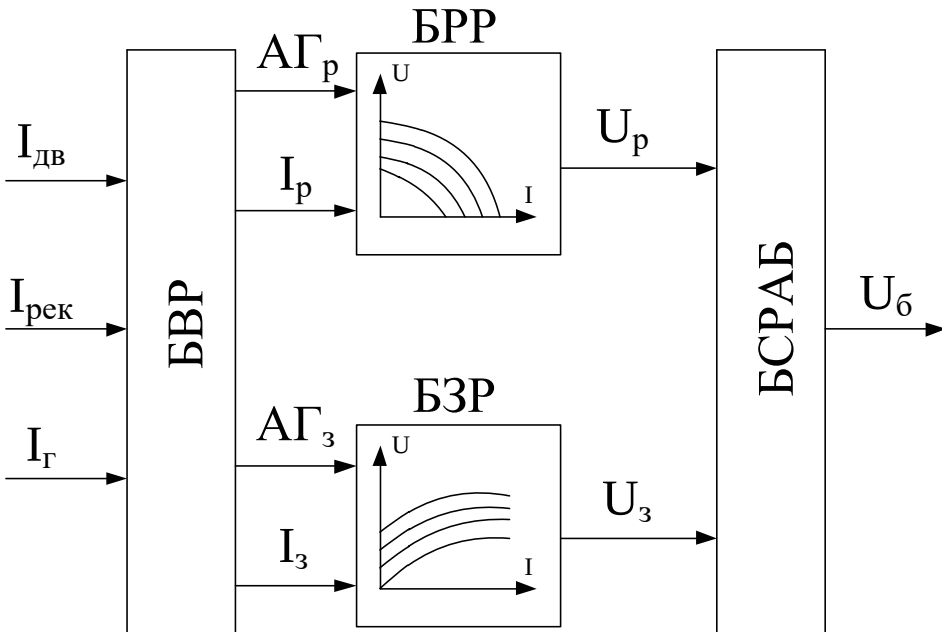


Рисунок 2 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї

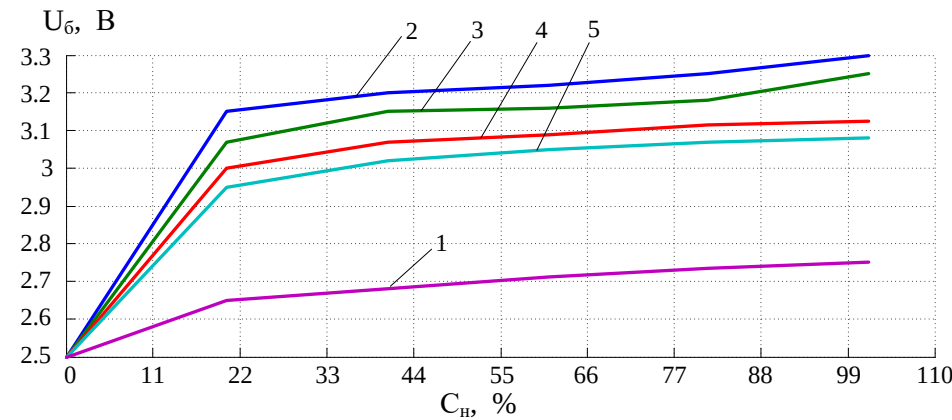


Рисунок 4 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 130

Переваги та недоліки застосування тягового асинхронного привода 7

- Має кращі масогабаритні показники;
- Вищий коефіцієнт потужності за рахунок перетворювачів в режимі тяги та рекуперативного гальмування;
- За рахунок векторного керування забезпечується оптимальне регулювання тягових та гальмівних характеристик, при яких забезпечується найменші витрати електроенергії в режимі тяги та найбільше повернення її в накопичувачі енергії при рекуперативному гальмуванні;
- Висока вартість обладнання;
- Складність реалізації векторного керування.

Результати моделювання прямого пуску асинхронного двигуна Mitsubishi i-MiEV

8

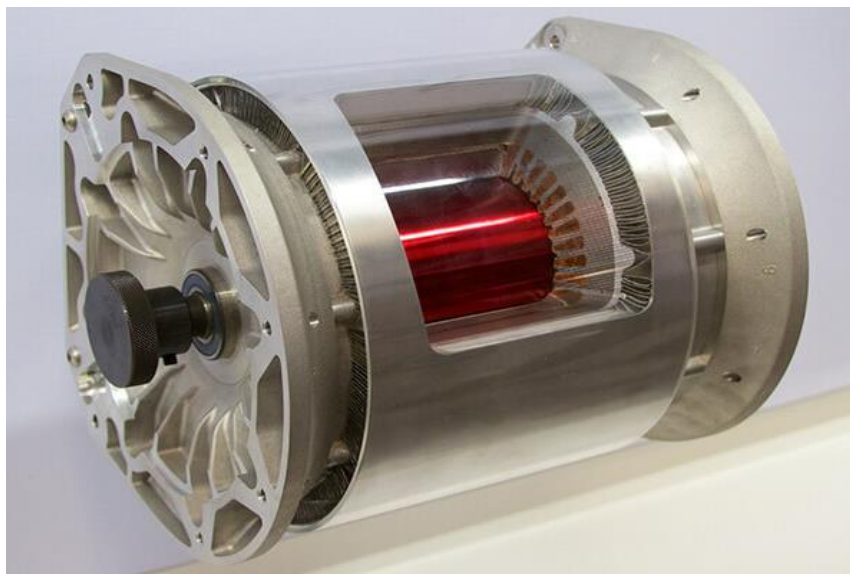


Рис. 1 – Загальний вигляд АД

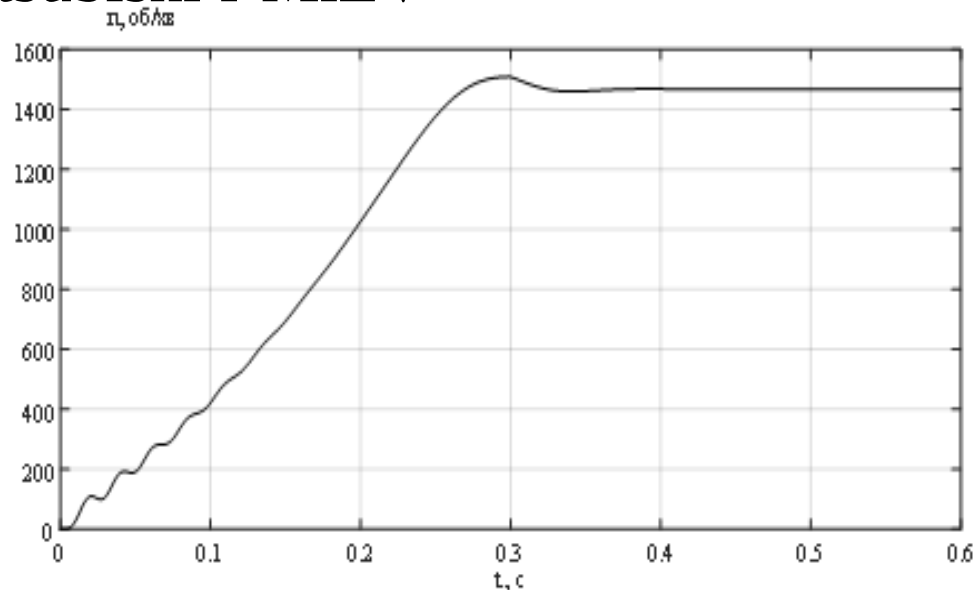


Рис. 3 – Швидкість АД

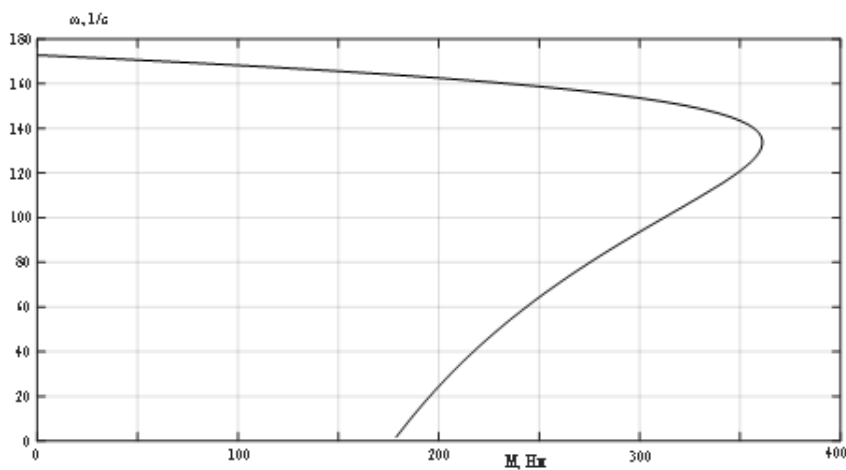


Рис. 2 – Механічна характеристика АД

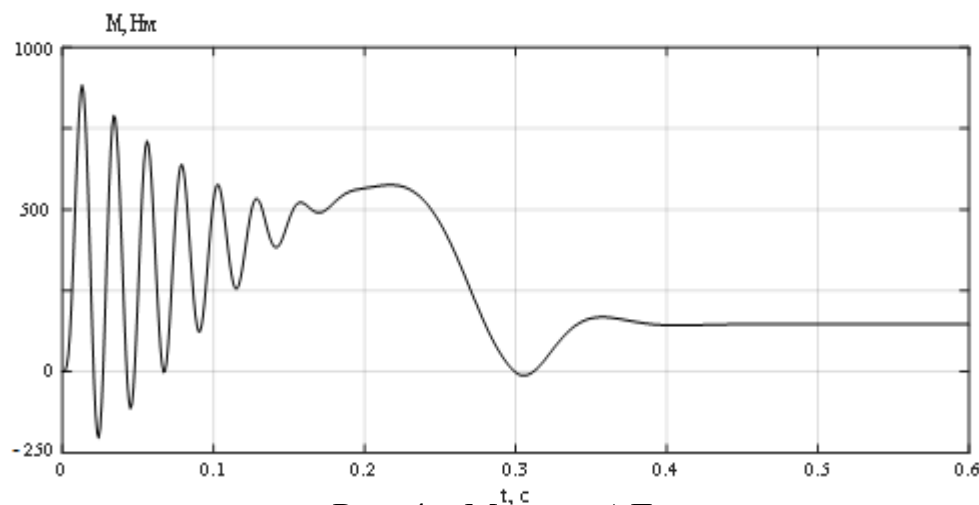
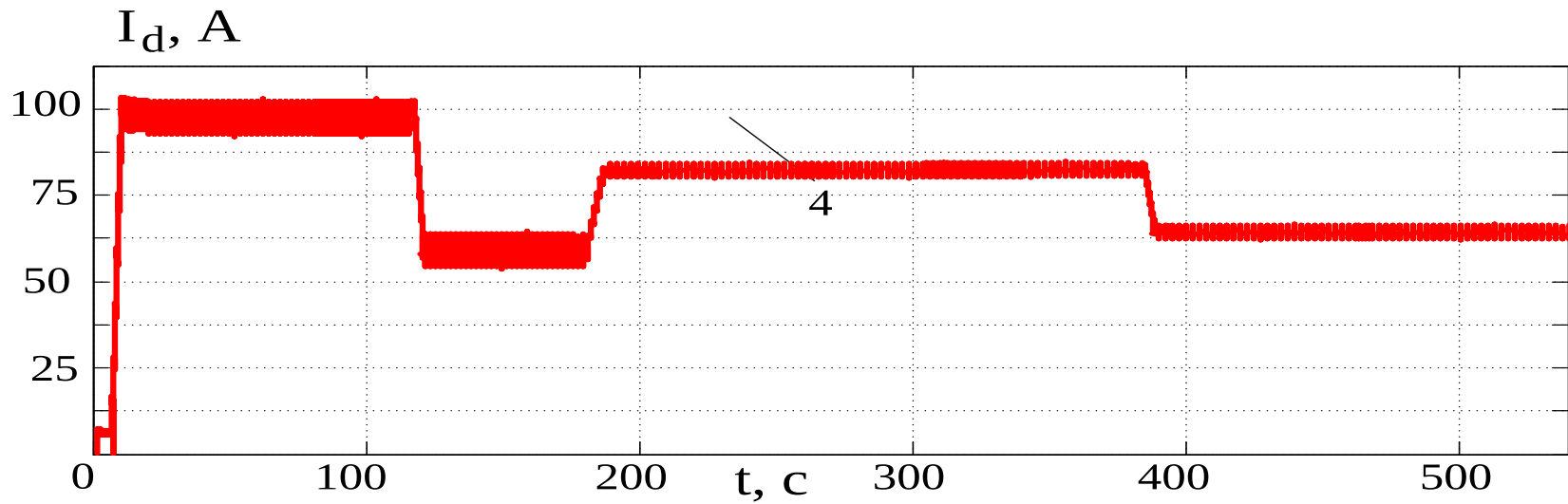
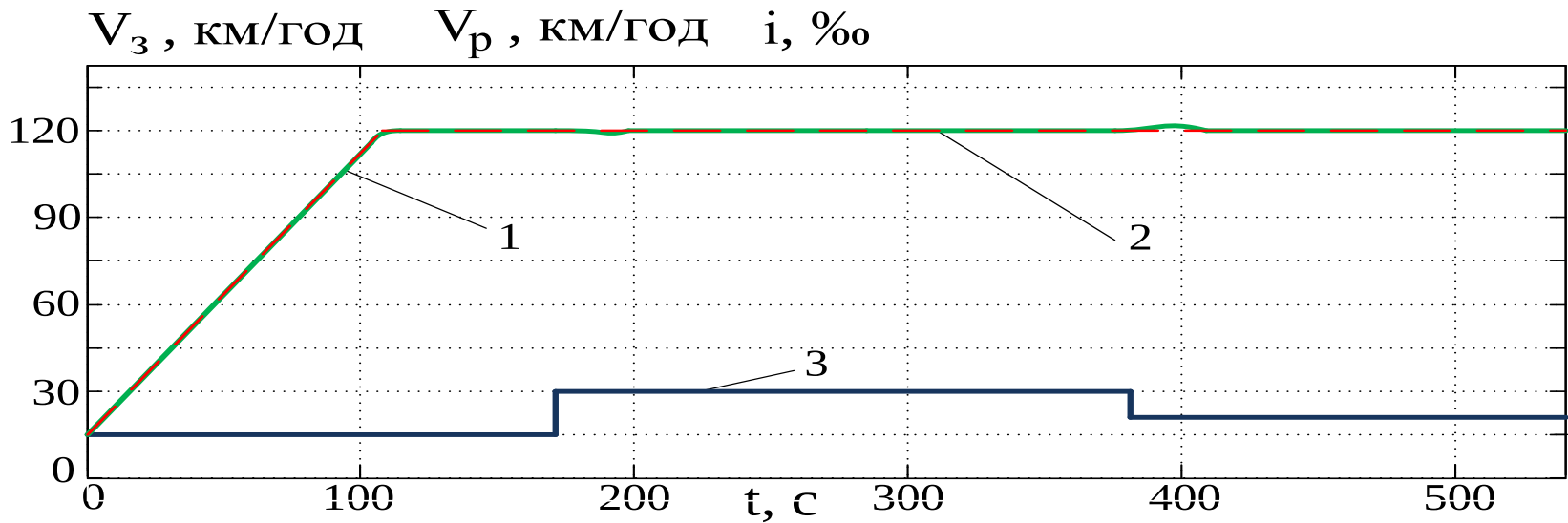


Рис. 4 – Момент АД

10





Висновки

- Проведене дослідження роботи автомобіля з двигуном внутрішнього згорання;
- Запропоновано систему електромобіля з асинхронним двигуном;
- Розроблено імітаційну модель роботи асинхронного двигуна з векторною системою керування та літій-іонної акумуляторної батареї;
- Розроблено та досліджено на імітаційній моделі роботу електромобіля з асинхронним приводом та акумуляторною батареєю в якості джерела живлення;
- Завдяки впровадженню автомобіля було виявлено, що витрати на ТО знизяться на 36%, витрати на живлення – на 54%. Капітальні вкладення повинні окупитись вже через 7 років.