

ЕМБ2015
(шифр)

**«ДОСЛІДЖЕННЯ РЕКУПЕРАТИВНИХ РЕЖИМІВ
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З
СУПЕРКОНДЕНСАТОРНОЮ БАТАРЕЄЮ»**

Спеціальність:

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

Спеціалізація:

Автомобільна електроніка

2020/2021

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Принципова схема електроприводу	5
1.1 Призначення компонентів схеми.....	5
1.2 Принцип дії схеми в рекуперативних режимах.....	6
2 Математична модель електромеханічної системи.....	9
2.1 Рівняння механіки.....	9
2.2 Електромагнітне та електромеханічне перетворення енергії в рекуперативних режимах.....	11
2.3 Рівняння керування та зворотніх зв'язків.....	17
2.4 Структурна схема.....	19
3 Комп'ютерна модель. Аналіз результатів моделювання.....	21
Висновок.....	27
Список літератури.....	28

ВСТУП

Історія електромобіля почалася раніше, ніж було винайдено двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ), а саме з 1828 року, коли угорський винахідник Аньош Джедлик створив прототип електродвигуна та невеличкий транспортний засіб на його основі[1]. Впродовж 19-го сторіччя у декількох країнах швидкими темпами розвивалась ця галузь, аж поки світ не захопили автомобілі з ДВЗ. Це пов'язано з тогочасною складністю виготовлення як електромоторів, так і акумуляторних батарей, та, в цілому, електромобілі не могли змагатися з бензиновими авто за дальністю проїзду.

У XX віці практично весь автотранспорт мав ДВЗ – бензинові чи дизельні, а їхня кількість зросла настільки, що наприкінці сторіччя це створило серйозні проблеми:

1. Екологічні: внаслідок викидів газів у багатьох великих містах забруднення повітря почало досягати критичного стану.

2. Споживання органічних паливних ресурсів (ОПР): нафти, газу, які також є сировиною для важливих продуктів життєдіяльності людини (синтетики, фарб, гербіцидів та інших), викликало загрозу їхньої нестачі для наступних поколінь.

3. Спалювання ОПР сприяло підвищенню температури та погіршенню кліматичних умов.

Для України, яка забезпечена власними енергоресурсами лише на 48%, а решта одержується за рахунок імпорту, на що витрачаються значні валютні кошти, тому це ще й економічна проблема.

Завдяки технічному прогресу у XXI віці розпочалася активна розробка та виробництво електромобілів, у яких джерелом механічної енергії став автоматизований електропривод[2][3][4][5]. В даний час практично всі ведучі автомобільні фірми серійно випускають електромобілі (ЕМБ). Вже зараз їхні технічні показники не гірше, а іноді кращі, за автомобільні. Вже багато країн (Німеччина, Норвегія, Швеція, Індія та інші) прийняли рішення про заборону в найближчому майбутньому випуску автомобілів з ДВЗ[6].

Як стверджується в [7] «в автотранспорті, альтернативи електромобілю не існує». В Україні також швидко збільшується кількість ЕМБ. Так, у 2018 році за темпами росту їхньої кількості, Україна посіла 1-ше місце в Європі. Подальше зростання кількості електромобілів потребує відповідних кваліфікованих фахівців для діагностики, програмування, ремонту, обслуговування та експлуатації електроприводів (ЕП) електромобілів.

У 2011 році на кафедрі НТУ «ХПІ» «Автоматизовані електромеханічні системи» була відкрита нова спеціалізація «Комп'ютеризовані системи електромобілів», та була поставлена задача спроектувати та створити електромобіль з мікропроцесорним електроприводом для учбових та наукових цілей, що вимагало вирішення задач методичного забезпечення учбового процесу лекційного, лабораторного, дослідницького характеру, курсового та дипломного проектування[8].

З методичних міркувань і умов створення ЕМБ, в якості електродвигуна для ЕП був обраний двигун постійного струму з постійними магнітами та живлення його від напівпровідникового перетворювача з мікропроцесорним керуванням і широтно-імпульсним регулюванням напруги (ШІП).

Однією з переваг ЕМБ є можливість підвищення його енергоефективності за рахунок перетворення в рекуперативних гальмівних режимах механічної енергії в електричну та повернення її джерелу живлення.

Мета роботи: проаналізувати особливості та фізичну сутність процесів електромагнітного та електромеханічного перетворення енергії при широтно-імпульсному керуванні електродвигуном електроприводу ЕМБ в гальмівних рекуперативних режимах. Створити математичні та комп'ютерну моделі електромеханічної системи електромобіля з урахуванням нелінійної аеродинамічної складової опору руху, та наявності суперконденсаторної батареї для дослідження вищевказаних і використання результатів досліджень в учбових та наукових цілях у зв'язку з підготовкою на кафедрі фахівців за спеціалізацією «Мехатроніка та робототехніка».

1 ПРИНЦИПОВА СХЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Як було зазначено вище, з методичних міркувань та з урахуванням умов створення ЕП ЕМБ, в якості електродвигуна ЕП було обрано, призначений для електротранспорту, електродвигун постійного струму з постійними магнітами. У липні 2015 року, на базі вітчизняного автомобіля «Ланос» було створено електромобіль і проведені його перші випробування (рисунок 1.1). Об'єктом дослідження в роботі є електропривод цього електромобіля.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд електромобіля

1.1 Призначення компонентів схеми

Спрощена принципова електрична схема електроприводу електромобіля з суперконденсаторною батареєю, наведена на рисунку 1.2[9].

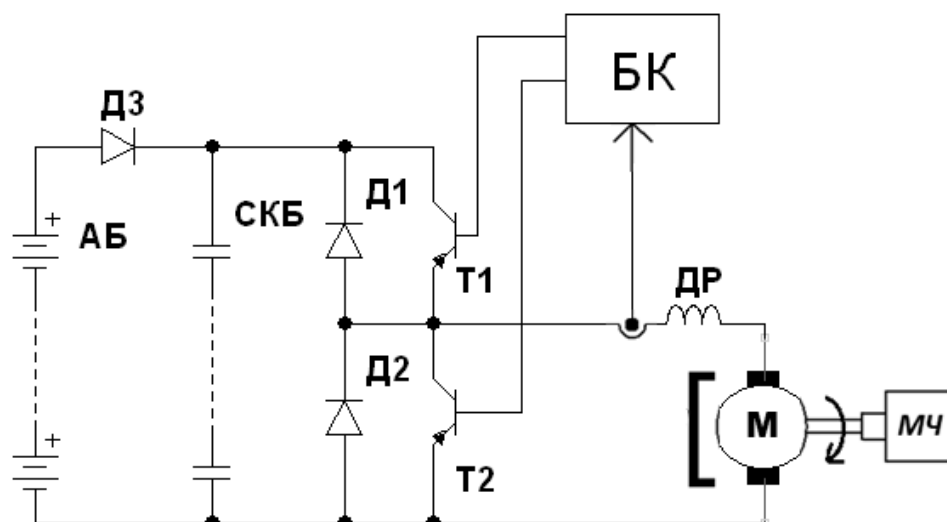


Рисунок 1.2 – Спрощена принципова схема

В схемі:

- АБ – акумуляторна батарея, основне джерело живлення;
- СКБ – суперконденсаторна батарея;
- Т1 та Т2 – польові транзистори, які виконують роль силових ключів;
- Д1 – діод, що створює шлях протікання струму до СКБ в рекуперативному режимі;
- Д2 – діод, що шунтує електродвигун;
- Д3 – діод, що запобігає протіканню струму від СКБ при перевищенні на ньому напруги АБ;
- М – електродвигун, як було зазначено вище – двигун постійного струму незалежного збудження з постійними магнітами. Цей тип двигуна було вибрано з методичних міркувань, оскільки спрощує усвідомлення фізичної сутності електромагнітних та електромеханічних процесів, перетворення енергії, що мають місце при роботі електроприводу в різних режимах.
- ПМ – постійні магніти електродвигуна;
- МЧ – механічна частина ЕП приводних коліс;
- БК – блок керування напівпровідниковим перетворювачем.
- ДР – дросель накопичування електромагнітної енергії.

Технічні дані компонентів схеми, що використані при моделюванні, наведені у розділі 3.

1.2 Принцип дії схеми в рекуперативних режимах

У двигунному режимі періодичне замикання та розмикання транзистору Т1 призводить до живлення якоря електродвигуна М прямокутною імпульсною напругою. При замкненні Т1, напруга дорівнює напрузі АБ U_{AB} , або СКБ $U_{СКБ}$, якщо напруга на останній перевищує U_{AB} . При розімкненні Т1, струм якоря електродвигуна i_a протікає через діод Д2, у напрямі, що відповідає двигунному режимові.

Перехід до гальмівного режиму, що має місце при зменшенні швидкості руху ЕМБ, або на початку руху згори, переводом транзистора Т1 у вимкнений режим, а Т2 починає періодично замикатися та розмикатися. Деякий час під дією електрорушійної сили (ЕРС) електродвигуна має місце зниження двигунного струму. Після зміни знаку струму якоря на протилежний, починається гальмівний режим, що супроводжується протіканням струму через транзистор Т2, при замкненні якого закорочується ланка «ДР-якірна обмотка М». Кожне розмикання Т2 призводить протікання струму через діод Д1 та СКБ, викликаючи її заряд і перетворюючи накоплену в ДР електромагнітну енергію в електричну. При цьому напруга $U_{СКБ}$ підвищується до значень, що перевищують U_{AB} , але з діод Д3 запобігає протіканню струму в АБ. Це покращує тепловий режим АБ, збільшуючи ресурс пробігу ЕМБ на одному заряді. Перехід від гальмівного рекуперативного режиму до наступного двигунного (наприклад, після зупинки перед світлофором) у перший період здійснюється за рахунок електроенергії, накопиченої в СКБ. Це в більшій мірі знижує навантаження на АБ, покращуючи її тепловий режим, а відповідно й термін роботи.

На рисунку 1.3 наведена, як приклад, стандартна тахограма міського руху ЕСЕ-15[10]. З неї витікає, наявність в ній ділянок різного виду: прискорення, руху з постійною швидкістю, зниження швидкості, гальмування до повної зупинки, а також інтервали зупинок.

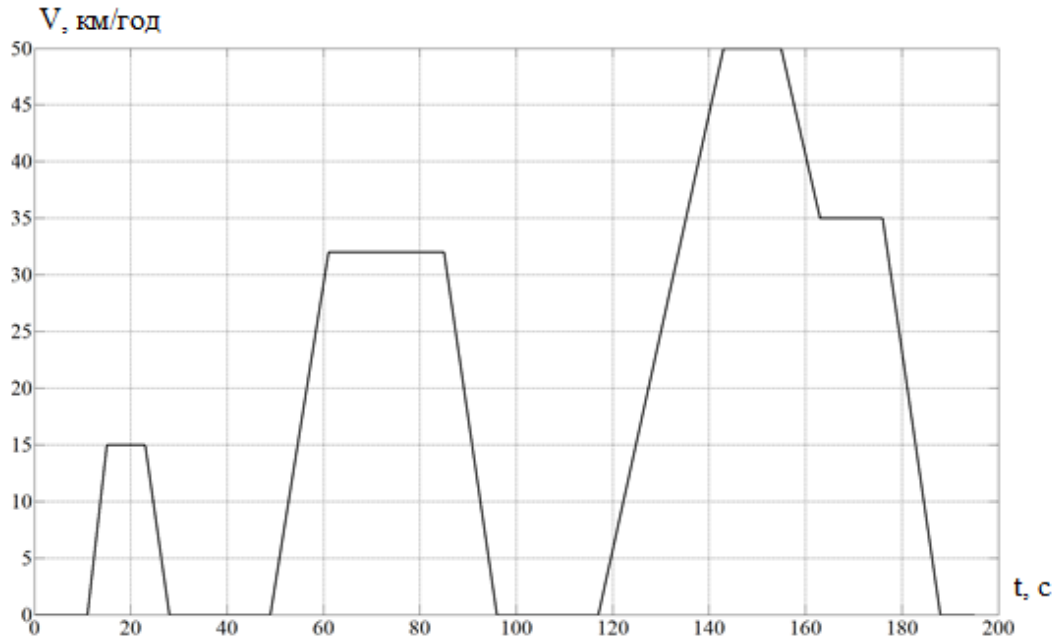


Рисунок 1.3 - Тахограма циклу міського руху

При прискореннях підвищення швидкості супроводжується збільшенням кінетичної енергії ЕМБ, яка дорівнює:

$$W_{ел} = \frac{mV^2}{2} \quad (1.1)$$

При гальмівному рекуперативному режимі ця енергія перетворюється спочатку на електромагнітну енергію дроселю та індуктивності обмотки якоря $W_{ел}$, а потім – у електричну енергію, що накоплюється в СКБ. Треба відмітити, що рекуперативний гальмівний режим може також здійснюватися при русі згори з усталеною швидкістю – в цьому випадку має місце перехід потенційної енергії у рекуперовану.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

У загальному випадку математична модель електромеханічної системи містить рівняння[11]:

- 1) механіки;
- 2) електричних та електромагнітних процесів;
- 3) електромеханічного перетворення енергії;
- 4) керування та зворотних зв'язків.

2.1 Рівняння механіки

При русі електромобіля, на нього діють сили опору, що показані на рисунку 2.1.

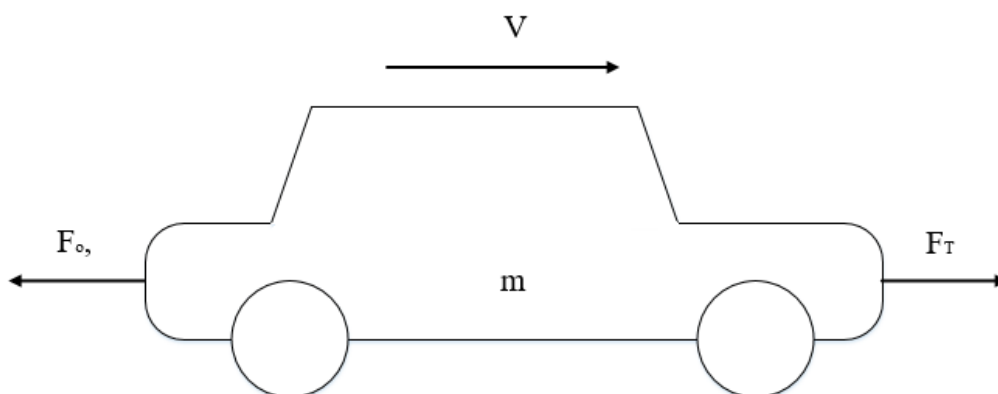


Рисунок 2.1 – Сили, які діють на електромобіль

Сила опору руху створюється декількома складовими [12]:

$$F_o = F_{\text{терт}} + F_{\text{аерд}} + F_{\text{тяж}}, \quad (2.1)$$

де F_o - сила опору руху, Н;

$F_{\text{терт}}$ – сила тертя кочення, Н;

$F_{\text{аерд}}$ – сила аеродинамічного опору, Н;

$F_{\text{тяж}}$ – проекція сили тяжіння при русі по дорозі з ухилом, Н.

$$F_{\text{терт}} = \mu mg \cos \alpha , \quad (2.2)$$

де μ - коефіцієнт тертя кочення;

m – маса автомобіля, кг;

g – прискорення вільного падіння;

α - кут ухилу.

Аеродинамічна складова нелінійно залежить від швидкості руху:

$$F_{\text{аерд}} = k_{\alpha} V^2 , \quad (2.3)$$

де V – швидкість руху, м/с;

k_{α} – аеродинамічний коефіцієнт, що дорівнює:

$$k_{\alpha} = \frac{C_x \rho_{\text{пов}} S}{2} , \quad (2.4)$$

де C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору;

$\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря, кг/м³;

S - площа лобового опору, м².

Проекція сили тяжіння дорівнює:

$$F_{\text{тяж}} = mg \sin \alpha . \quad (2.5)$$

Таким чином, загальний вираз для сили опору руху матиме вигляд:

$$F_o = \mu mg \cos \alpha + \frac{C_x \rho_{\text{пов}} S}{2} V^2 + mg \sin \alpha . \quad (2.6)$$

Рівняння механіки одержуємо при допущенні, що зв'язки між кінематичними ланками жорсткі, тому механічну систему можна розглядати як одномасову.

Виходячи з другого закону Ньютона [5]:

$$F_T - F_o = m_{\Sigma} \frac{dv}{dt} , \quad (2.7)$$

де F_T – рушійна сила, яку створює момент ЕД, Н;

F_o – сила опору руху, Н;

v – лінійна швидкість руху ЕМБ, м/с;

m_{Σ} – приведена маса ЕМБ, кг;

$$m_{\Sigma} = m_M + \frac{2J_K}{r_K^2}, \quad (2.8)$$

де J_K – момент інерції колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

r_K – радіус колеса електромобіля, м;

m_M – маса електромобіля, кг.

Рушійна сила авто створюється обертовим моментом двигуна, що передається на колеса через трансмісію ТР з передавальним числом $i_{\text{тр}}$.

2.2 Рівняння електромагнітних процесів та електромеханічного перетворення енергії

Розглянемо електромагнітні процеси, які мають місце в силовому колі ЕП при різних станах силових транзисторів Т1 та Т2. При замкненому стані Т1 до якоря ЕД прикладається напруга джерела живлення (АБ чи СКБ). При замиканні Т2 транзистор Т1 вимикається, тобто часова діаграма напруги на якорі ЕД має вигляд (рисунок 2.3).

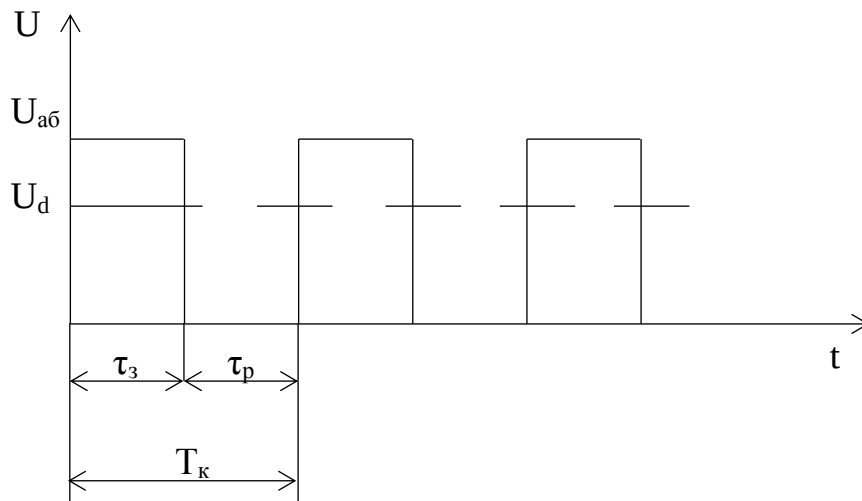


Рисунок 2.3 – часова діаграма імпульсної системи

На діаграмі використані наступні позначення:

τ_z – час замкненого стану Т1, с;

τ_p – час розімкнутого стану Т1, с;

T_k – період комутації, с;

U_{ab} – напруга АБ, В;

U_d – середня напруга, В:

Загальна розрахункова схема силового кола ЕД надана на рисунку 2.4. Виходячи з цієї схеми, створимо розрахункові схеми для кожного з часових інтервалів періоду комутації транзистора Т1.

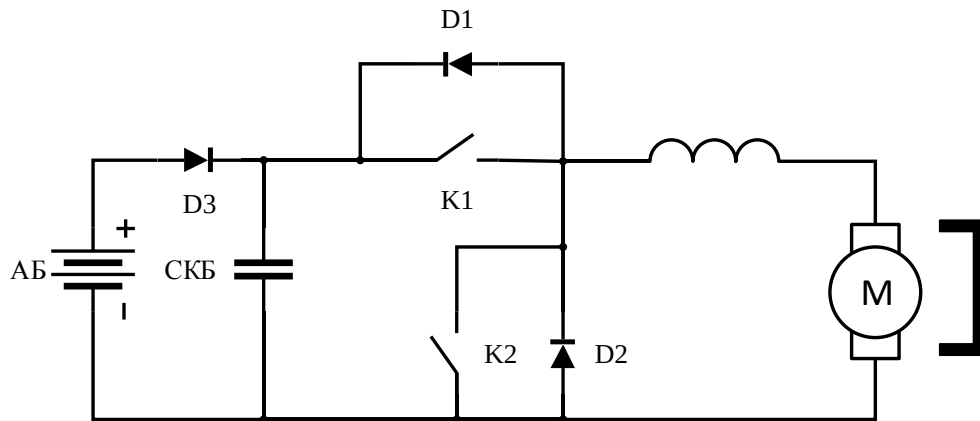


Рисунок 2.4 – Загальна розрахункова схема

В рушійному режимі така схема має вигляд (рисунок 3.5).

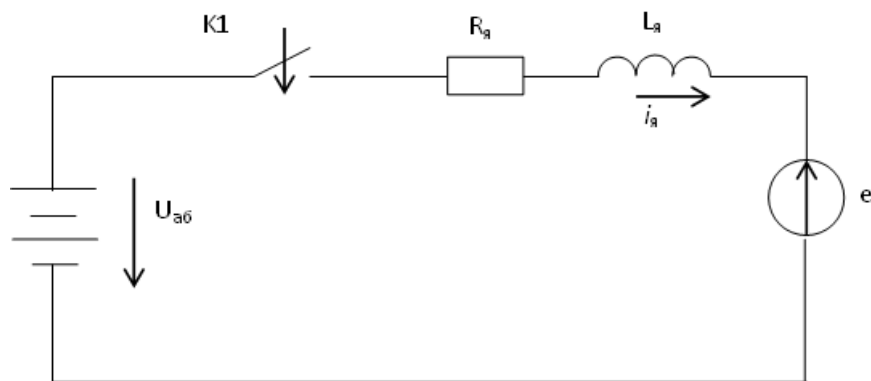


Рисунок 2.5 – Рушійний режим роботи ЕД

Згідно з другим законом Кірхгофа[13]:

$$U_{ab} = i_{я} \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{di_{я}}{dt} + e, \quad (2.9)$$

де $R_{я\Sigma}$ – опір якірного кола, Ом;

$i_{я}$ – миттєве значення струму, А;

$L_{я\Sigma}$ – індуктивність якірного кола, Гн;

e – миттєве значення ЕРС, В.

В операторній формі, рівняння матиме вигляд:

$$U_{аб}(p) = i_{я} \cdot R_{я\Sigma}(p) + L_{я\Sigma} p \cdot i_{я}(p) + e(p), \quad (2.10)$$

Електромагнітна стала кола $T_{я} = R_{я\Sigma}/L_{я\Sigma}$. Враховуючи співвідношення 2.10, отримаємо передатну функцію ланки електромеханічного перетворення енергії:

$$W(p) = \frac{i_{я}(p)}{U_{аб}(p) - e(p)} = \frac{1}{R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma}(p)} = \frac{1/R_{я\Sigma}}{T_{я} p + 1} \quad (2.11)$$

Рівняння 2.10 є диференціальним рівнянням першого порядку і його рішення, як відомо, дорівнює:

$$i_{я} = (I_{поч} - I_{кін}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{я}}} + I_{кін}, \quad (2.12)$$

де $I_{поч}$ и $I_{кін}$ – струми якоря в період комутації ключа К1, А;

$T_{я}$ – електромагнітна стала, с.

Коли ключ Т1 розмикається, струм, що протікає в індуктивності не може миттєво змінитися та продовжує протікати по електричному колу через діод D2. Розрахункова схема в цьому разі має наступний вигляд (рисунок 2.6):

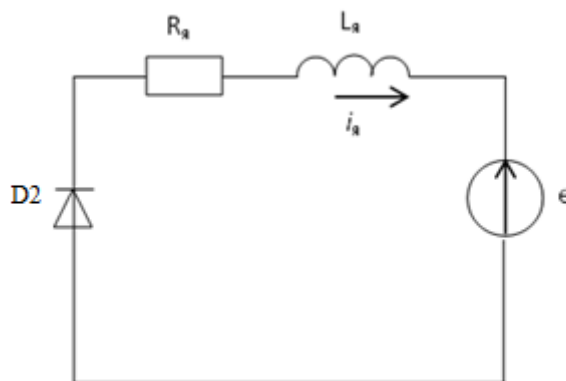


Рисунок 2.6 – схема заміщення при розімкнених ключах

Рівняння електричного кола у цьому випадку:

$$i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} = -e, \quad (2.12)$$

тобто також є диференціальним рівнянням першого порядку.

Під дією ЕРС e спрямованої назустріч струму $i_{\text{я}}$, струм спадатиме по експоненціальному закону, причому в сталому імпульсному режимі кінцеве значення струму замкненого стану Т1 є початковим, для розімкненого в інтервалі τ_p , а кінцеве - для замкненого стану (формула 2.13).

$$i_{\text{я}} = (I_{\text{кон}} - I_{\text{нач}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} + I_{\text{нач}}, \quad (2.13)$$

Часова діаграма струму у двигунному режимі виглядатиме так (рисунок 2.7):

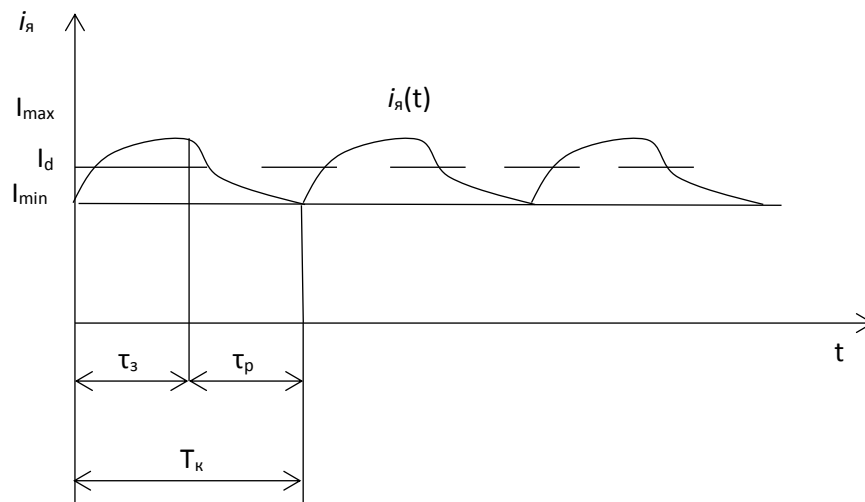


Рисунок 2.7 – Часова діаграма якорного струму

При рекуперативному гальмуванні, транзистор Т1 вимикається, а Т2 починає періодично замикає та розмикає коло якоря двигуна за законом широтно-імпульсної модуляції. В цьому разі при замкненому Т2 розрахункова схема має вигляд (рисунок 2.8). На першому етапі, струм якоря продовжує протікати у тому ж напрямі, зменшуючи своє значення під дією протиЕРС при замкненому Т2 і протікаючи через діод Д2 при розімкненому (рисунок 2.8а). Через деякий незначний час (оскільки $T_{\text{я}} = 0.0046$ с), струм змінює свій напрям і двигун переходить в гальмівний режим. Після цього кожне розмикання ключа Т2 призводить до протікання гальмівного струму через діод Д1 і СКБ (рисунок

2.8б), віддаючи їй перетворену в електричну, механічну кінетичну енергію руху при зниженні швидкості, або потенційну енергію при русі під уклін. При цьому діод ДЗ блокує протікання гальмівного струму через АБ, покращуючи таким чином тепловий режим її роботи.

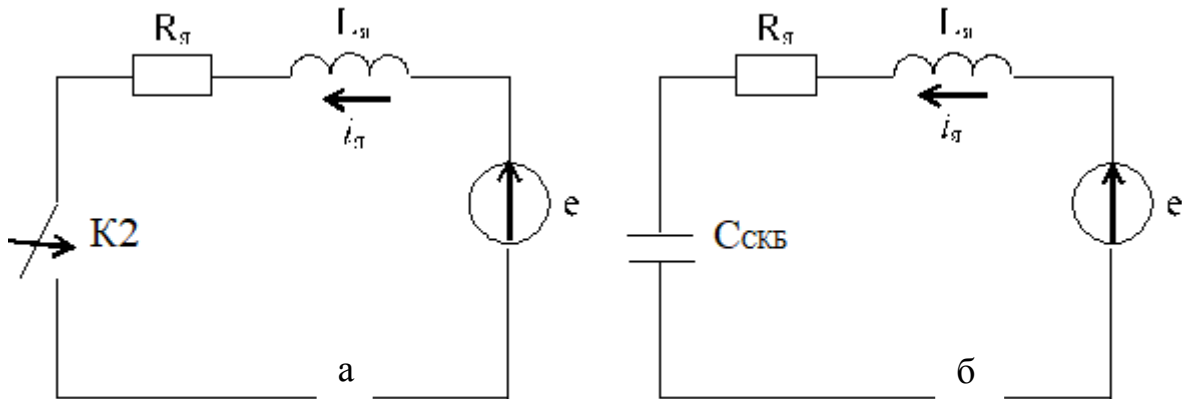


Рисунок 2.8 – Розрахункові схеми рекуперативного режиму

Як видно з розрахункових схем, вони аналогічні схемам для рушійного режиму роботи, тому також описуються диференціальними рівняннями першого порядку.

Кількість енергії, що накопичуватиметься в СКБ за період комутації транзистора Т2, дорівнює:

$$W'_{СКБ} = \frac{L_{я} \cdot I_{\max}^2}{2} - \frac{L_{я} \cdot I_{\min}^2}{2}, \quad (2.14)$$

де $I_{\max}$ – максимальне значення струму, А;

$I_{\min}$ – мінімальне значення струму відносно заданого середнього значення струму гальмування, А.

Звичайно, за кожен період це значення достатньо мале, але враховуючи, що за одну секунду здійснюється 20 тисяч комутацій, кількість накопиченої СКБ енергії, дорівнює $W_{СКБ} = W'_{СКБ} \cdot f$.

Під дією гальмівного моменту швидкість електромобіля буде знижуватися, а при умові регулювання струму, її зниження буде постійним.

За допомогою рівнянь електромеханічного перетворення енергії встановлюється взаємозв'язок між механічними, електричними та магнітними величинами, що мають місце у електродвигуні. Такими рівняннями є наступні[11],[14]:

$$\begin{cases} M = K\Phi i \\ E = K\Phi\omega \end{cases} \quad (2.15)$$

де K – конструктивний коефіцієнт двигуна;

Φ – магнітний потік двигуна, Вб.

Через те, що в напівпровідниковому перетворюючі процеси комутації проходять з високою частотою (20 кГц), стала комутації значно менша за електромагнітну та електромеханічну сталі кола електроприводу, то в математичній моделі можна використати середні значення за період, тобто рівняння електричного кола матиме наступний вигляд:

$$U_d = I_d \cdot R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_d}{dt} + E \quad (2.16)$$

ЕД, як відомо, містить і механічну ланку, що є якорем або ротором. Враховуючи на введені обмеження про абсолютну жорсткість, тобто одномасовість механічної системи, основне рівняння електроприводу виглядатиме так:

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.17)$$

де J_{Σ} – сумарний приведений до валу двигуна момент інерції.

Приведення до кутової швидкості валу електродвигуна виконується за відомими співвідношеннями [11]. Повний момент інерції електроприводу визначаємо як суму приведенного моменту інерції обертових частин і приведеної до швидкості двигуна маси електромобіля.

Після приведення до одномасової схеми, за умови, що в системі усі зв'язки абсолютно жорсткі сумарний момент інерції матиме вигляд:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{д}} + m \cdot \rho^2, \quad (2.18)$$

де ρ – радіус приведення, м.

З урахуванням 2.15 - 2.18, ланка електромеханічного перетворення у структурній формі матиме вигляд [15]:

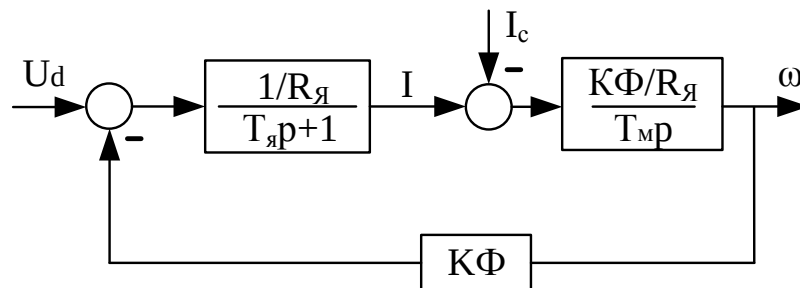


Рисунок 2.10 – структурна модель ДПС з постійними магнітами

На рисунку використані наступні позначення:

R_a – опір якорного кола, Ом;

T_a – електромагнітна стала часу, с;

T_m – електромеханічна стала часу, с.

ω – номінальна швидкість обертання двигуна, 1/с;

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.19)$$

2.3 Рівняння керування та зворотних зв'язків

Як було раніше зазначено, управління рухом здійснюється водієм шляхом натискання педалі акселератора, що відповідає завданню рушійного моменту через регулювання сили струму. Необхідна швидкість руху забезпечується точкою статичної рівноваги на перетині статичних механічних характеристик електроприводу і навантаження. Інтенсивність зміни швидкості (прискорення) визначається різницею між моментом електропривода M і моменту опору руху M_c , яку можна визначити з основного рівняння ЕП (формула 2.17).

Механічну характеристику ЕП з регулятором струму показана на рисунку:

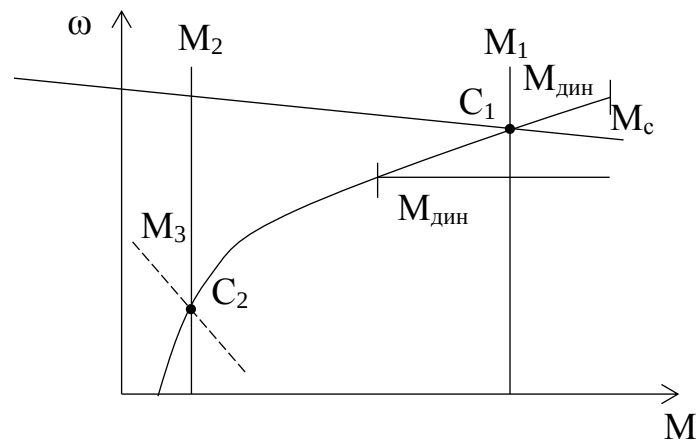


Рисунок 2.11 – механічна характеристика регулятора струму

Як видно з рисунку 3.11, завдяки нелінійному характеру сили (моменту) опору руху від швидкості за рахунок аеродинамічній складової в сталому режимі забезпечується стійкість точки статичної рівноваги C_1 . Дійсно відхилення швидкості як в сторону збільшення так і зниження від цієї точки створює динамічний момент $M_{\text{дин}} = M_1 - M_c$, який намагається повернути робочу точку в точку статичної рівноваги. Це створює умови для управління швидкістю руху шляхом регулювання моменту або струму двигуна.

Відмітимо, що у зоні малих швидкостей (пряма M_2), статична стійкість значно менше. Як бачимо зменшення жорсткості МХ ЕП пунктирна пряма M_3 підвищує статичну стійкість ЕП. Це означає, що з точки зору статичної стійкості, регулятор струму може бути не тільки пропорційно-інтегруючим, а й пропорційним.

Для електромобіля з міркувань безпеки руху особливо важливо забезпечити такі динамічні показники, як висока швидкодія і мале перерегулювання.

В роботі використано пропорційно-інтегруючий регулятор струму типу ПІ.

Структурна схема для кола з датчиком струму має вигляд (рисунок 2.12):

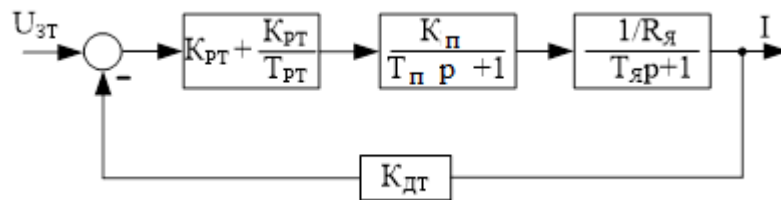


Рисунок 2.12 – Структурна схема регулятора струму з датчиком

Коефіцієнт зворотнього зв'язку (коефіцієнт датчика струму) вибираємо за наступною умовою:

$$K_{дт} = \frac{U_3}{2 \cdot I_n}, \quad (2.20)$$

де U_3 - напруга завдання, 1 В;

I_n - номінальний струм двигуна, А.

2.4 Структурна схема

Частота комутації перетворювача дорівнює 20 кГц, тобто період імпульсів - 50 мкс, електромагнітна стала $T_{я}$ на два ступені перевищує період імпульсів. Цей факт дає можливість побудувати структурну математичну модель по середньому значенню струму та напруги, як зазначено в розділі 2.2. В цьому випадку ланки напівпровідникового перетворювача та електромеханічного перетворення енергії мають вигляд аперіодичної ланки першого ступеню.

Виходячи з рівнянь 2.9-2.18 та зробивши перехід до операторної форми, отримаємо математичну модель електромеханічної системи в структурній формі у вигляді (рисунок 2.13).

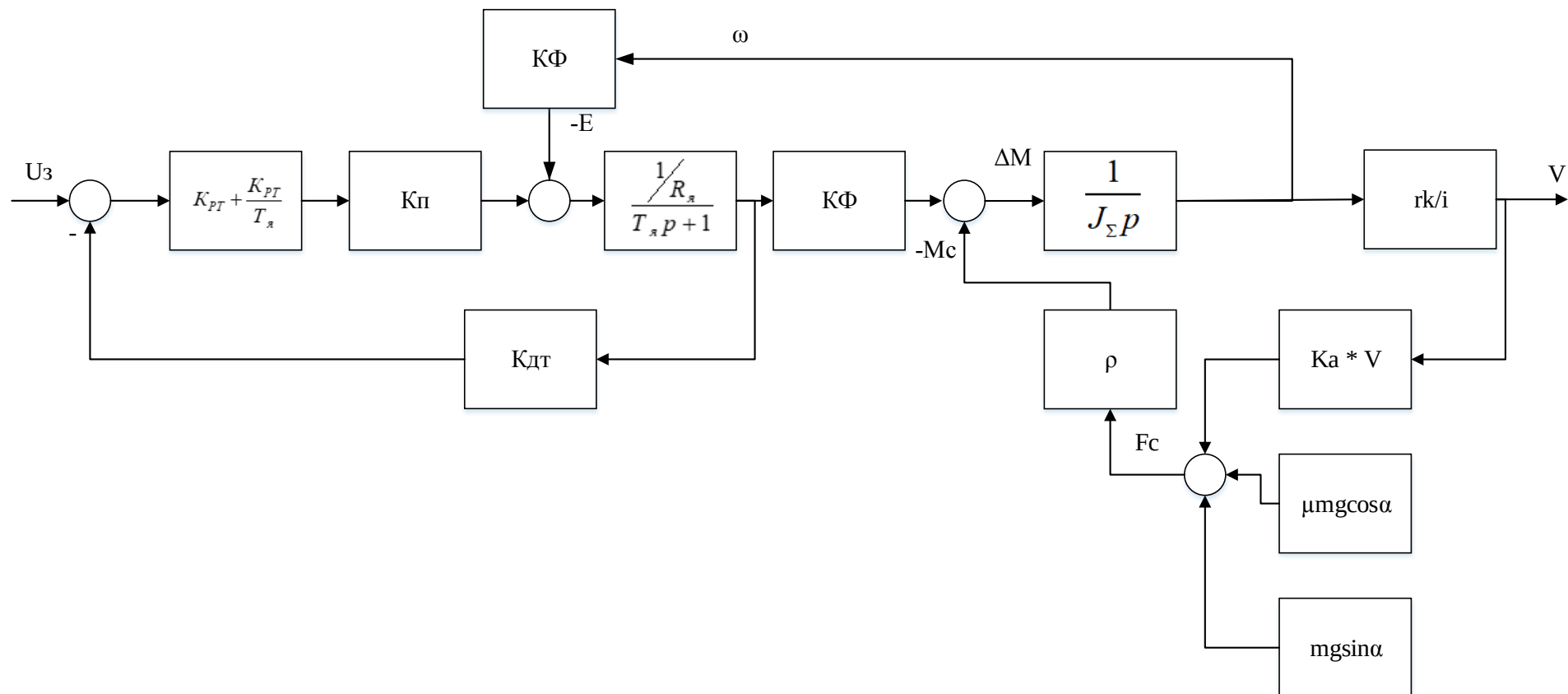


Рисунок 2.13 – Структурна схема електромеханічної системи ЕП ЕМ

3 КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

За отриманою структурною схемою побудована комп'ютерна модель з використанням пакету програм Matlab/Simulink [16], що приведена на рисунках 3.1 – 3.3.

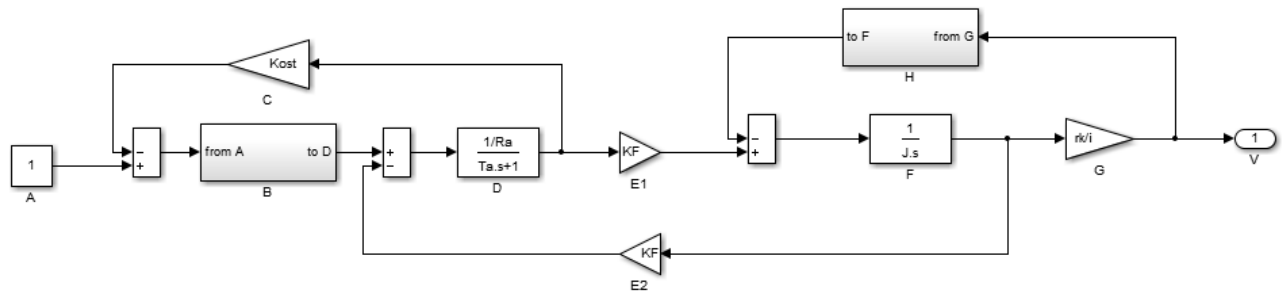


Рисунок 3.1 – Згорнута комп'ютерна модель

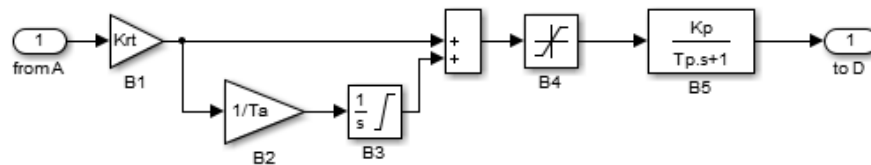


Рисунок 3.2 – Підсистема В

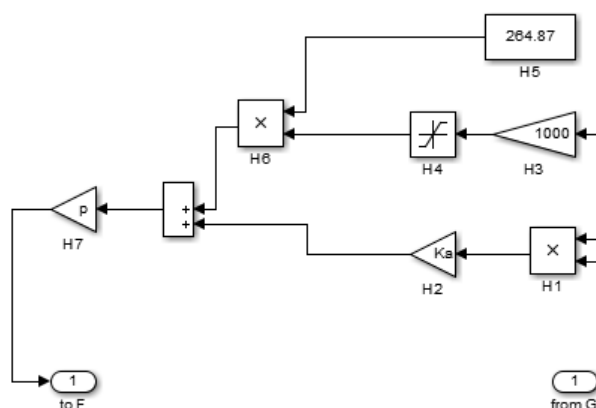


Рисунок 3.3 – підсистема Н

На рисунках латинськими літерами позначені наступні елементи системи:

A – керуюче завдання, B;

B – розімкнена передатна функція регулятора струму;

С – зворотній зв'язок регулятора струму;
 D – ланка електромеханічного перетворення енергії;
 E1 – ланка перетворення струм в момент;
 E2 – ланка перетворення швидкості в ЕРС;
 F – ланка механічного перетворення енергії;
 G – блок приведення обертової швидкості двигуна до лінійної швидкості електромобіля;

На рисунку 3.2 застосовані наступні позначення:

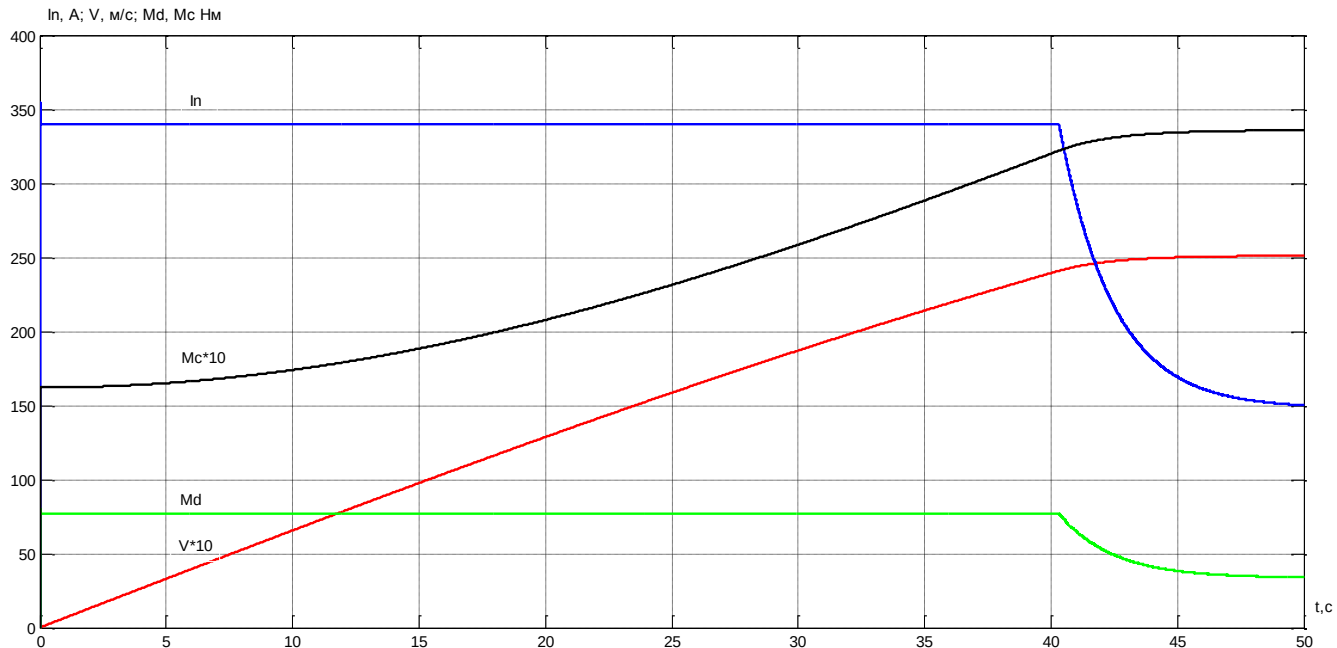
B1, B2, B3 – параметри регулятора струму;
 B4 – блок обмеження напруги, яка подається на ШІМ, В;
 B5 – передатна функція напівпровідникового перетворювача;
 Н – блок моменту опору, на рисунку 3.3 де застосовані наступні позначення:

Н1, Н2 – сила аеродинамічного спротиву;
 Н3, Н4, Н5, Н6 – сила тертя качення;
 Н7 – радіус приведення сили опору до моменту на валу двигуна;
 V – вихідна координата, що є лінійною швидкістю ЕМБ.

При моделюванні використані наступні значення параметрів складових електромеханічної системи:

Маса електромобіля - $m=1500\text{кг}$,
 Максимальна швидкість руху - $V_{\text{макс}} = 90 \text{ км/год}$,
 Коефіцієнт тертя - $\mu = 0.018$,
 Коефіцієнт аеродинамічного опору повітря - $C_x = 0.3$;
 Лобова площа електромобіля - $S = 2.5\text{м}^2$;
 ККД трансмісії - $\eta_{\text{тр}} = 0.95$;
 Радіус колеса - $r_K = 0.295\text{м}$;
 Тахограма руху – ЕСЕ-15.

На рисунку 3.4 надані результати комп'ютерного моделювання при пуску ЕП і значенні вхідного сигналу завдання контуру струму, що дорівнює 1В.

Рисунок 3.4 – Пуск при $U_3 = 1V$

Проаналізуємо одержані часові діаграми з точки зору їхньої відповідності сутності фізичних процесів, що протікають в електромеханічній системі при пуску за даними параметрами. Синя крива являє собою часову діаграму зміни струму I_a під час пуску, чорна - моменту опору M_o , збільшена в 10 разів, зелена – моменту двигуна M_d , червона – лінійна швидкість ЕМБ, збільшена в 10 разів.

Для уяснення часових діаграм, що відбивають зміну координат ЕП під час перехідного процесу нижче наведено характер механічних характеристик - M_d ЕП і навантаження - M_o .

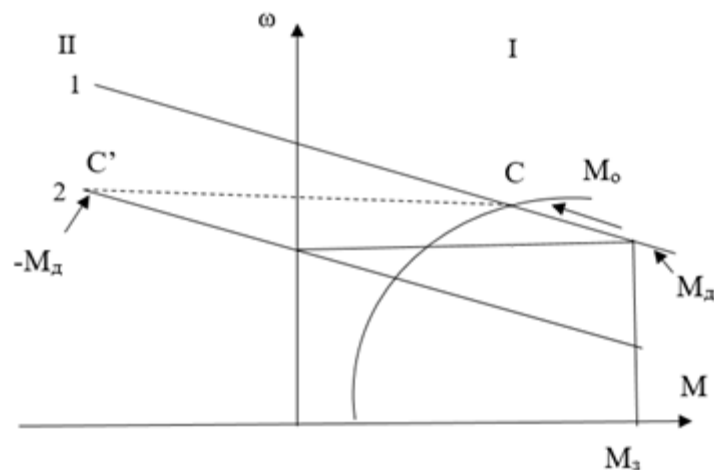


Рисунок 3.5 – Механічні характеристики ЕП

Співставимо відповідність переміщення робочої точки на часових діаграмах 3.4 з переміщенням її по механічним характеристикам згідно рисунку 3.5. З цього рисунку видно, що на момент пуску, заданий регулятором струму момент M_3 підтримується незмінним під час збільшення швидкості та суттєво перевищує момент опору. Внаслідок цього існує значний динамічний момент

$$M_{\text{дин}} = M_d - M_o, \quad (3.1)$$

завдяки якому йде підвищення швидкості ЕМБ. Так як спочатку аеродинамічна складова M_a суттєво менша за складову тертя M_r , тобто динамічний момент суттєво перевершує момент опору руху, лінійна швидкість ЕМБ змінюється практично лінійно. Після досягнення швидкості V_d , що відповідає кутовій швидкості ω_m перетворювач виходить на обмеження по напрузі, якій відповідає механічна характеристика M_d , тому регулятор моменту не в змозі підтримувати заданий момент M_3 , але згідно взаєморозміщення механічних характеристик M_3 та M_o існує динамічний момент $M'_{\text{дин}}$, тому підвищення швидкості продовжується. Перехідний процес при переміщенні робочої точки до співпадіння M_o M_d в точці статичної рівноваги С, за своїм характером близький до перехідних процесів першого типу, тобто має експоненціальний характер. В даних процесах координати змінюються за експоненціальним законом. Дійсно, (як це відповідає рисунку 3.4) починаючи з 40-ї секунди, струм зменшується, а швидкість збільшується за експоненціальним характером. Це надає можливість стверджувати про адекватність комп'ютерної та математичної моделей і можливість використання останньої для подальших моделювань інших режимів.

Промодельємо процес зниження швидкості ЕМБ з рекуперативним гальмуванням при русі по горизонтальній ділянці дороги. Комп'ютерний експеримент проведемо наступним чином: спочатку виконуємо розгін ЕМБ при сигналу завдання 1В впродовж 10, 20, 30 с, за які ЕМБ досягає відповідних швидкостей, після чого знижуємо сигнал завдання до 0.1 В. Результати моделювання наведені на рисунку 3.6.

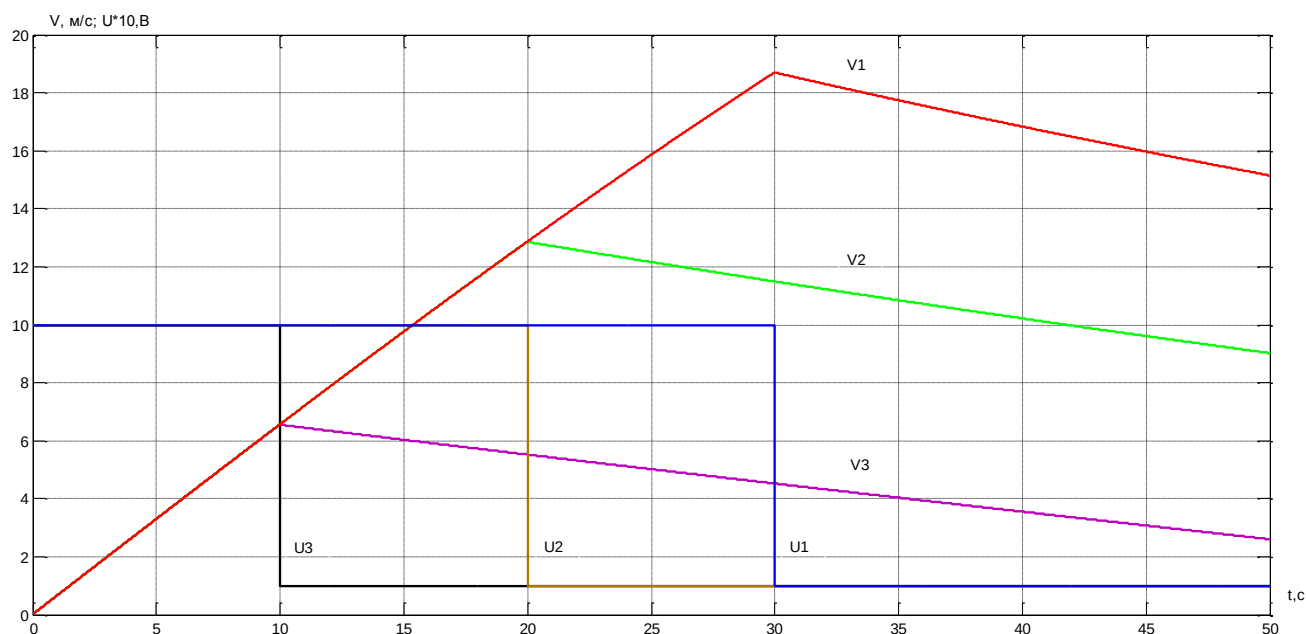


Рисунок 3.6 – Рекуперативне гальмування при різному часі розгону

Часові діаграми підтверджують, що зниження сигналу завдання призводить до зменшення швидкості ЕМБ відносно досягнутої, після зміни сигналу завдання. Перехід до рекуперативного режиму також підтверджується рисунком 3.5. Дійсно, зниження сигналу завдання призводить до зменшення напруги перетворювача та переходу на іншу механічну характеристику M_{d2} . Так як швидкість, внаслідок механічної інерційності, не може змінюватись миттєво, то з точки С, яка належить до I-го (двигунного) квадранту робоча точка переміщується у II-ий – генераторний (гальмівний) квадрант, на характеристику 2, якій відповідає від’ємний гальмівний момент – M_d . Кутова швидкість для точки С’ вища, ніж кутова швидкість холостого ходу механічної характеристики 2. Це свідчить, що даний гальмівний режим є рекуперативним.

Третій експеримент – рекуперативне гальмування при розгону по горизонталі та переходу на 30-й секунді до руху під уклін. Цей перехід призводить до того, що з’являється складова проекції сили тяжіння, яка діє у напрямку руху ЕМБ. Значення уклону було прийнято рівним $\alpha = 14^\circ$. Результати моделювання наведені на рисунку 3.7.

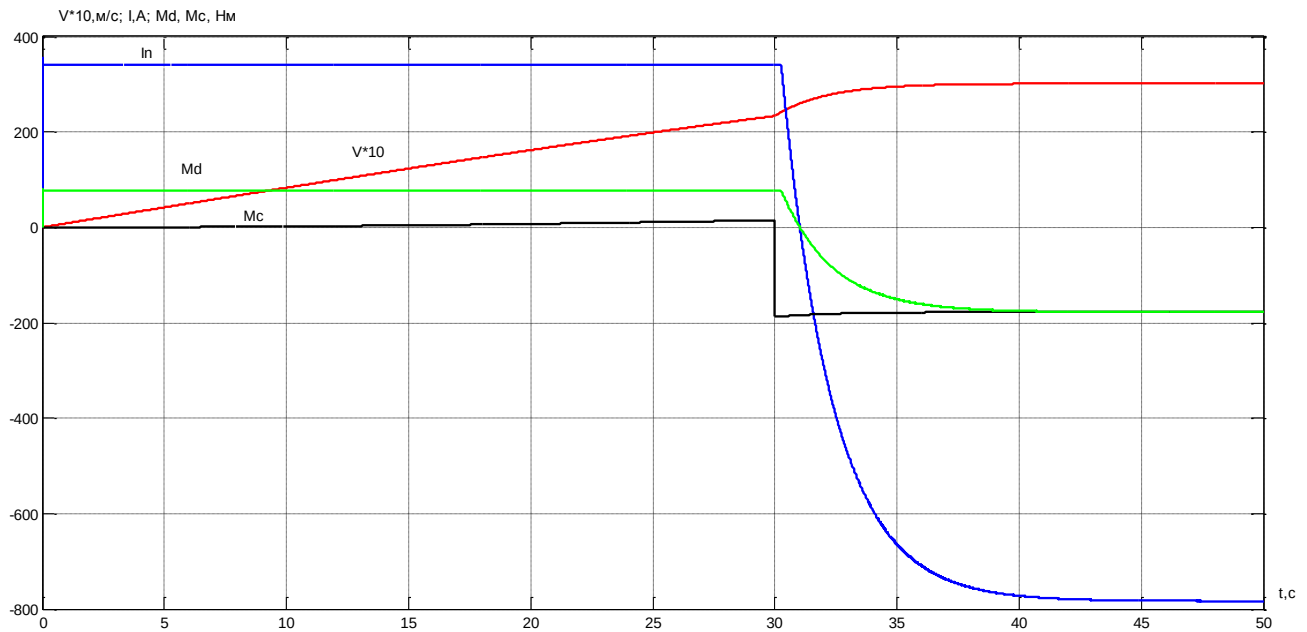


Рисунок 3.7 – рух по горизонталі та під уклін

Як бачимо, струм двигуна I_d (синя часова діаграма) починає зменшуватися, і в подальшому змінює свій знак з додатного на від’ємний, що свідчить про перехід до гальмівного режиму. Рекуперативний характер процесів в ЕП забезпечується переходом до комутації транзистора Т1 і здійснюється, як це було описано у розділі 2.2. Момент опору (чорна крива) змінює свій знак на протилежний завдяки появі проекції сили тяжіння, яка діє у напрямку руху ЕМБ. Тобто моделювання підтверджує відповідність часових діаграм фізиці механічних, електромагнітних та електромеханічних процесів.

Розроблена математична модель за гладкою складовою змін координат була використана при розробці лабораторних робіт, співставленні результатів з моделюванням з імпульсною моделлю пакету Matlab/SimPower і підтвердила можливість спрощення комп’ютерної моделі електромеханічної системи ЕП ЕМБ. Розрахунки економії електроенергії, завдяки реалізації рекуперативних режимів гальмування для 7-ми стандартних циклів руху, показують можливість економії електроенергії АБ у розмірі 12-24%[17].

ВИСНОВОК

Результати комп'ютерних експериментів підтверджують адекватність математичних і комп'ютерної моделей і відповідність розрахованих часових діаграм фізичній сутності процесів, що досліджувались. Це свідчить про можливість використання цих моделей для подальшого поглибленого дослідження рекуперативних режимів електроприводу електромобілів при різних параметрах і умовах руху, визначення обсягів збереження електричної енергії джерела живлення, збільшення пробігу електромобілів за один заряд, покращення теплового режиму акумуляторної батареї та доцільність використання моделі для учбових цілей при підготовці бакалаврів і магістрів спеціальності 141 спеціалізації «Мехатроніка та робототехніка».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car - Electric Car
- 2 Larminie J, Lowry J. Electric Vehicle Technology Explained. – John Wiley & Sons, Ltd. – 2003. – 303 p.
- 3 Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. – Taylor and Francis Group, LLC. – 2010. – 558 p.
- 4 Song J. & Boo, K. (2004). Performance evaluation of traction control systems using a vehicle dynamic model. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218(7), 685-696.
- 5 Kajiwara Shinji. (2019). Motion Dynamics Control of Electric Vehicles.105572/interchopen.77261.
- 6 Швеція в 2030 году запретит продажу автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Режим доступа – <https://www.interfax.ru/world/647390>.
- 7 Шидловский А.К. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте / А.К. Шидловский, В.Б. Павлов, А.В. Попов // Технічна електродинаміка – 2008. -№4. С.43-47.
- 8 Клепиков В.Б. – О подготовке специалистов-электромехаников для электробилестроения – Электротехнические и компьютерные системы. 2011 №(03)/79
- 9 Патент України №85585 «Электропривод электромобиля», Клепиков В.Б., Гончар О.С., Касторний П.М., та інші. 25.11.2013.
- 10 https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle - New European Driving Cycle
- 11 Ключев В.И. Теория Электропривода – М.:Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

- 12 Клепиков В.Б., Семиков А.В., Сақун Е.В., Ротару А.В., Воробьёв Б.В. – моделирование динамических процессов электромеханической системы электромотобила при буксовании колес – Internacional Conference “Modern problem of power engineering and ways of solving them” – Тбилиси, 7-11 октября 2019.
- 13 Демирчян К.С., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники – СПб.: «Питер», 2003.- 463 с.
- 14 Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. – СПб.: «Питер», 2008. – 320 с.
- 15 Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і догі. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
- 16 Victor M. Perelmuter. Electromechanical Systems. Simulation with Simulink and SimPowerSystems. Taylor & Francis Group,LLC – 2013. – 434 p.
- 17 Клепиков В.Б., Гончар А.С. - Рекуперативні режими електропривода електромотобила із суперконденсаторами – Електромеханічні і енергозберігаючі системи 3/2012 (19).