

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсової роботи
з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем"
на тему "Моделювання тягово-швидкісних характеристик
автомобіля з гібридною силовою установкою"

Харків 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи

**з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем"
на тему "Моделювання тягово-швидкісних характеристик
автомобіля з гібридною силовою установкою"**

для студентів всіх форм навчання

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Затверджено

методичною радою університету,

протокол № __ від _____ 2024 р.

Харків 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До друку та в світ дозволяю

професор _____ А.Г. Батракова

“ ___ ” _____ 2024 року

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи

**з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем"
на тему "Моделювання тягово-швидкісних характеристик
автомобіля з гібридною силовою установкою"**

Всі цитати, цифровий,
фактичний матеріал
та бібліографічні
відомості перевірені,
написання одиниць
відповідає стандартам

Затверджено
методичною радою університету,
Протокол № __ від ____ 2024 р.

Укладачі:

О. П. Смирнов

А. О. Борисенко

Відповідальний за випуск

А. В. Гнатов

Харків 2024

Укладачі:

О. П. Смирнов

А. О. Борисенко

Кафедра Автомобільної електроніки

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Методичні вказівки складені для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Виконання курсової роботи виконується для денної форми навчання у 8-му семестрі, за допомогою ліцензійної програми Simulink, та є підсумковим етапом при вивченні дисципліни “Моделювання електромеханічних систем”.

В курсовій роботі необхідно провести моделювання тягово-швидкісних характеристик автомобіля з гібридною силовою установкою, яка включає в себе штатний двигун внутрішнього згоряння та додатковий тяговий електричний двигун. Дана тематика є одним з основних напрямків науково-технічної діяльності кафедри автомобільної електроніки по створенню енергозберігаючих та екологічно чистих автотранспортних засобів.

Мета курсової роботи – отримати навички моделювання електромеханічних систем та процесів в програмі Simulink, а саме провести проектування моделі автомобіля з гібридною силовою установкою, яка включає двигун внутрішнього згоряння, тяговий електричний двигун та інші системи та агрегати, а також порівняти тягово-швидкісні властивості базового автомобіля з автомобілем, який використовує гібридну силову установку. В результаті моделювання необхідно отримати відповідні порівняльні тягово-швидкісні характеристики базового та конверсійного автомобіля та визначити доцільність установки тягового електричного двигуна.

Зміст курсової роботи визначається його завданням. Об’єм пояснювальної записки повинен складати 25...30 сторінок. Її обов’язкові розділи: вибір початкових даних базового автомобіля, який наводиться за інформацією з науково-технічної літератури та мережі Internet, моделювання тягово-швидкісних характеристик автомобіля, моделювання сил, які діють на автомобіль, моделювання системи керування, моделювання тягового електричного двигуна, порівняльна оцінка тягово-швидкісних властивостей базового та гібридного автомобілів, висновки. Для моделювання схем та порівняльної оцінки використовують програму Simulink, результати моделювання додають до пояснювальної записки.

Основні критерії оцінки роботи студента

Основні критерії оцінки роботи студента в результаті виконання курсової роботи з дисципліни “Моделювання електромеханічних систем” та переведення показників успішності знань студентів наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні критерії оцінки роботи студента

Роз'яснення оцінки	Кількість балів	Оцінка за	
		шкалою ECTS	національною шкалою
1	2	3	4
Відмінна побудова моделі тягово-швидкісних характеристик базового та конверсійного автомобіля та відповідних графічних матеріалів. Виконання завдань курсової роботи проведено без помилок, зміст пояснювальної записці повністю відповідає завданню. Вірно виконаний розрахунок та наочно побудовані порівняльні тягово-швидкісні характеристики автомобіля з гібридною силовою установкою та автомобіля з ДВЗ. При захисті роботи студент показує відмінні навички моделювання електромеханічних систем та процесів, вільно проводить корегування та вдосконалення побудованої моделі. Студент дає чітке пояснення вирішеної задачі, вільно володіє засобами моделювання. Вірно сформульовані висновки по роботі. Курсова робота акуратна оформлена.	90 - 100	A	відмінно (зараховано)
Курсова робота виконана на рівні вище середнього. У роботі зустрічаються деякі помилки та недоліки. Вірно виконаний розрахунок та наочно побудовані порівняльні тягово-швидкісні характеристики автомобіля з гібридною силовою установкою та автомобіля з ДВЗ. При захисті роботи студент показує добрі навички моделювання електромеханічних систем та процесів, проводить корегування та вдосконалення побудованої моделі. Студент дає вірне пояснення вирішеної задачі, добре володіє засобами моделювання. Вірно сформульовані висновки по роботі. Курсова робота акуратна оформлена.	80 - 89	B	добре (зараховано)

продовження табл. 1

1	2	3	4
<p>Загалом завдання курсової роботи виконані правильно, у повному обсязі, але з певною кількістю помилок. Виконаний розрахунок та наочно побудовані порівняльні тягово-швидкісні характеристики автомобіля з гібридною силовою установкою та автомобіля з ДВЗ. При захисті роботи студент показує добрі навички моделювання електромеханічних систем та процесів, проводить корегування та вдосконалення побудованої моделі. Студент дає пояснення вирішеної задачі, добре володіє засобами моделювання. Сформульовані висновки по роботі.</p>	75 - 79	C	добре (зараховано)
<p>Непогане виконання завдань курсової роботи, але зі значною кількістю помилок. Вірно виконаний розрахунок та побудовані порівняльні тягово-швидкісні характеристики автомобіля з гібридною силовою установкою та автомобіля з ДВЗ. При захисті роботи студент показує задовільні навички моделювання електромеханічних систем та процесів, проводить корегування та вдосконалення побудованої моделі. Студент володіє засобами моделювання, але допускає неточності та помилки при поясненні моделі. Сформульовані висновки.</p>	67 - 74	D	задовільно (зараховано)
<p>Виконання завдань курсової роботи задовольняє мінімальні критерії. При захисті роботи студент показує задовільні навички моделювання електромеханічних систем та процесів, неточно та повільно проводить корегування побудованої моделі. Студент невпевнено та похибками дає пояснення вирішеної задачі, слабке володіє засобами моделювання. Недбалість у оформленні курсової роботи.</p>	60 - 66	E	задовільно (зараховано)
<p>Виконання завдань курсової роботи не задовольняє мінімальні критерії. Робота не захищена. Потрібне повторне виконання курсової роботи.</p>	35 - 59	FX	не задовільно (не зараховано)
<p>Курсова робота не виконана. Потрібне повторне виконання курсової роботи.</p>	1 – 34	F	не задовільно (не зараховано)

ЗМІСТ ТА ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ

1 Основи побудови математичних моделей

Математична модель являє собою формалізований опис системи за допомогою абстрактної мови, зокрема, за допомогою математичних співвідношень, що описують процес функціонування системи. Для складання моделі можна використати будь-які математичні засоби – алгебраїчні, диференціальне та інтегральне рахування, теорію множин, теорію алгоритмів та ін. У даний час потужним засобом для моделювання й дослідження систем керування зі зворотним зв'язком є програма Simulink.

Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем. Він дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем та удосконалювати проекти. Simulink повністю інтегрований с MATLAB, тому забезпечує оперативний доступ к широкому спектру інструментів аналізу та проектування.

Математична модель дозволяє вивчити властивості розроблювальної електромеханічної системи. При побудові математичних моделей необхідно встановити всі взаємозв'язки між змінними, які характеризують властивості та характеристики системи.

В якості об'єкта дослідження вибрана гібридна силова установка автомобіля, яка органічно об'єднує в собі традиційний двигун внутрішнього згоряння та додаткові електричні двигуни. Основна мета такої гібридизації – це підвищення потужності, економія пального та зниження токсичності вихлопних газів.

Гібридна силова установка автомобіля – система ефективної синергетичної взаємодії двигуна внутрішнього згоряння та електричних машин. Завдяки синергетичному комбінованому використанню ДВЗ та електричних машин гібридні автомобілі мають підвищений енергетичний та динамічний потенціал і відповідають найжорсткішим екологічним нормам. Перший серійний легковий автомобіль за гібридною технологією випустила корпорація “Toyota Motor Corporation” наприкінці 1997 року. Назву йому дали Prius, що в перекладі з латинської означає “іти попереду”. Сьогодні на автомобільному ринку присутні моделі гібридних автомобілів від практично всіх відомих автомобільних концернів [1,2].

2 Порівняльний аналіз основних властивостей ДВЗ та електричного двигуна

Розглянемо для порівняння енергетичні та економічні показники роботи ДВЗ та синхронного двигуна вентильного типу. Саме такий тип тягових електричних двигунів знайшов своє використання в гібридних силових установках автомобіля.

Одним з основних показників ДВЗ є його ефективна потужність N_e (кВт), яка розраховується за формулою [3]

$$N_e = \frac{p_e V_h n i_{\text{ц}}}{30\tau}, \quad (1)$$

де p_e – середній ефективний тиск в циліндрах, МПа, V_h – робочий об'єм циліндра, л, n – частота обертання колінчатого вала, хв⁻¹, $i_{\text{ц}}$ – число циліндрів у двигуні, τ – число ходів поршня за цикл.

Коли відома ефективна потужність N_e та відповідна до неї частота n вала ДВЗ, то ефективний момент на валу M_e (Нм) дорівнює

$$M_e = \left[\frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \right] \frac{N_e}{n} \quad (2)$$

Паливна економічність роботи двигуна оцінюється питомою ефективною витратою палива g_e (г/кВт·год.)

$$g_e = 10^3 \frac{G_{\text{нал}}}{N_e}, \quad (3)$$

де $G_{\text{нал}}$ – годинна витрата палива, кг/год.

Ефективний ККД ДВЗ – це відношення роботи, отриманої на валу двигуна, до енергії, що містилась у витраченому паливі

$$\eta_e = \frac{3600 N_e}{H_u G_{\text{нал}}}, \quad (4)$$

де H_u – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг.

Граничні значення ефективних показників автомобільних ДВЗ наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Ефективні показники ДВЗ

Тип ДВЗ	p_e , Мпа	g_e , г/кВт·год	η_e
Бензиновий	0.6...0.95	250...330	0.2...0.35
Дизельний без наддуву	0.55...0.85	210...260	0.33...0.40
Дизельний з наддувом	0.7...2.2	200...242	0.35...0.42

Для оцінки енергетичних та економічних показників ДВЗ використовують зовнішні швидкісні характеристики (рис. 1).

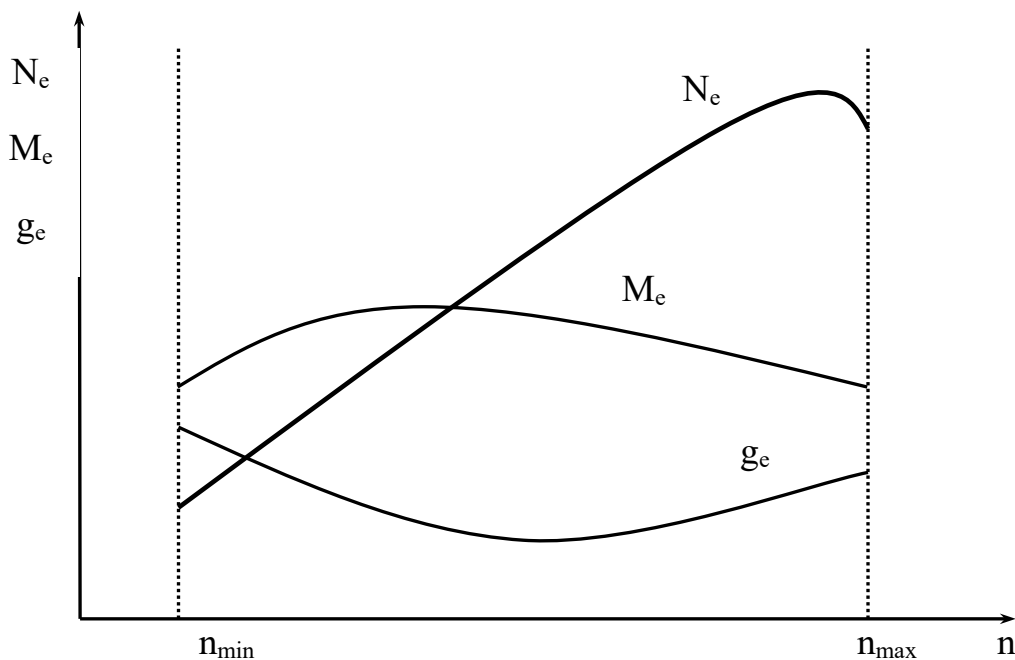


Рисунок 1 – Зовнішня швидкісна характеристика бензинового двигуна

Наведемо для порівняння основні рівняння та характеристики вентильного синхронного електричного двигуна, принцип дії якого та характеристики подібні колекторним двигунам постійного струму [4].

Електрорушійна сила якоря $E_{\text{я}}$ виражається залежністю

$$E_{\text{я}} = cK_i\Phi\omega, \quad (5)$$

де c – конструктивний коефіцієнт, K_i – коефіцієнт інвертування, Φ – повний магнітний потік, ω – кутова швидкість.

Момент M двигуна

$$M = cK_i\Phi I_{я}, \quad (6)$$

де $I_{я}$ – струм, який споживає якірна обмотка.

Потужність двигуна отримуємо з формул (4) і (5)

$$P = E_{я}I_{я} = M\omega \quad (7)$$

Механічна характеристика вентильних двигунів моделюється системою керування, яка забезпечує оптимальну роботу двигуна на різних режимах роботи. Вентильні двигуни реалізують максимальний обертаючий момент на старті, на відміну від ДВЗ, які здатні генерувати максимальний обертаючий момент лише на підвищеній частоті обертання. Тому навіть відносно невисока потужність електричного двигуна дозволить значно покращити динамічні характеристики автомобіля.

ККД сучасних вентильних двигунів досягає 98 %. Крім відносно високого ККД вентильні двигуни мають такі позитивні властивості, як високу надійність, термін служби, якість регулювання, можливість роботи в широкому діапазоні температур, вологості, тиску.

3 Синергетика двигунів

В автомобілебудуванні на сьогоднішній час приділяється дуже серйозна увага питанням створення ресурсозберігаючих, ефективних та екологічно чистих транспортних засобів. Найзначнішу роль у цьому призване зіграти гармонічне з'єднання новітніх комп'ютерних технологій, автомобільної електроніки, сучасних мехатронних систем. По суті, синергетичний (від грецького *synergos* – сукупно діючий) підхід – це і є об'єднання різних підходів та концепцій для комплексного досягнення певних цілей.

Для початку розглянемо синергетичну дію електричного двигуна невеликої потужності (10 кВт) в складі гібридної силової уста-

новки на прикладі гібридного двохмісного спорткара Honda Insight, який має 1.0 літровий 3-ох циліндровий двигун внутрішнього згоряння потужністю 50 кВт.

На рис. 2 наведені зовнішні швидкісні характеристики ДВЗ (пунктирна лінія) та гібридної силової установки (безперервна лінія) [3].

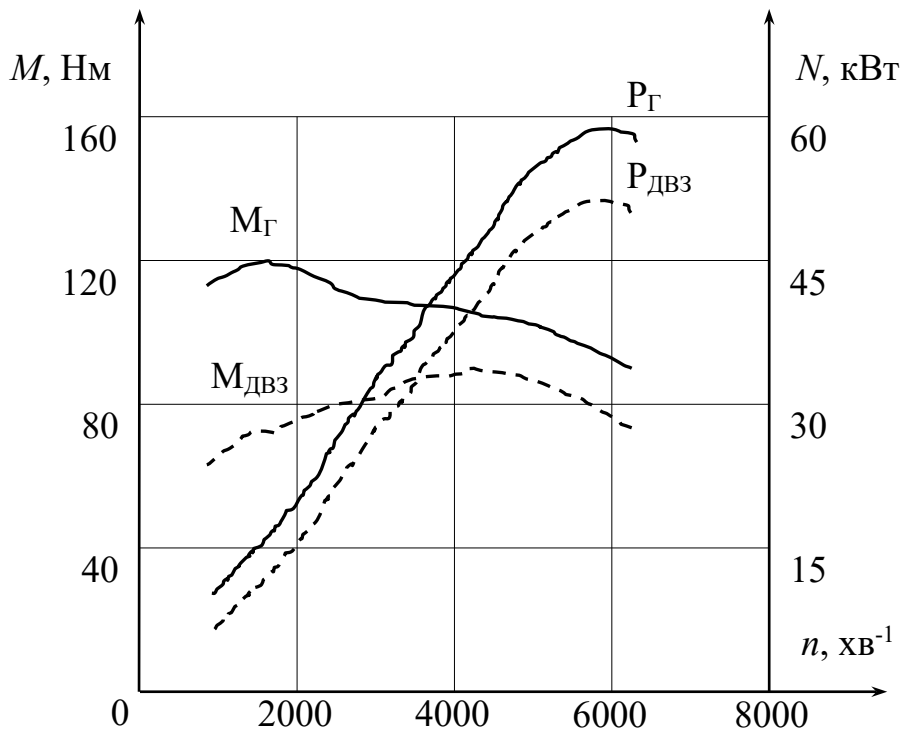


Рисунок 2 – Швидкісні характеристики гібридної силової установки автомобіля Honda Insight

Максимальний обертаючий момент гібридної силової установки автомобіля Honda Insight збільшився з 91 Нм до 121 Нм, а на малій частоті обертання момент зріс удвічі, що особливо важливо при початку руху та інтенсивному розгоні автомобіля. Потужність на всьому діапазоні частот зросла практично на величину потужності електричного двигуна.

Електричний двигун гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius має таку ж потужність, як і ДВЗ розглянутої вище Honda Insight, але його обертовий момент майже у 4.5 рази більше ніж у цього ДВЗ та дорівнює 400 Нм. Для порівняння, саме такий обертовий момент (400 Нм) має восьмициліндровий ДВЗ автомобіля Mercedes E 430 потужністю 200 кВт.

Порівняльний аналіз основних потужностних характеристик гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius

Параметр	ДВЗ	Електродвигун	Гібридна установка
Максимальна потужність, кВт при n , хв^{-1}	57 5000	50 1200...1540	82
Максимальний момент, Нм при n , хв^{-1}	115 4200	400 0...1200	478

Таким чином, в гібридних автомобілях можна використовувати ДВЗ меншої потужності та робочого об'єму. При цьому ДВЗ налагоджують на оптимальну витрату палива (див. рис. 1) та екологічну чистоту. Оптимальне керування потоками механічної та електричної енергії на різних режимах роботи дозволило підвищити ККД гібридних силових установок майже до 70 %. Такий високий ККД обумовлений також тим, що при гальмуванні та русі по інерції електричні двигуни перетворюються у генератори та заряджають акумуляторну батарею рекуперативною енергією гальмування автомобіля.

4 Завдання на виконання курсової роботи

4.1 Побудувати в програмі Simulink математичну модель заданого автомобіля, згідно варіанту завданій (табл. 3), або за завданням виклада. Початкові дані для моделювання автомобіля можна знайти в науково-технічній літературі.

Модель автомобіля складається з наступних підсистем:

- двигун внутрішнього згоряння;
- трансмісія;
- сили, що діють на автомобіль;
- система керування;
- тяговий електричний двигун.

4.2 Промоделювати процес руху автомобіля. За результатами моделювання провести вибір тягового двигуна постійного струму, згідно табл. 4, мінімально необхідної потужності достатньої для рівномірного руху автомобіля зі швидкістю 40 км/год.

Таблиця 3 – Варіанти завданій до курсової роботи

№	Модель автомобіля	№	Модель автомобіля	№	Модель автомобіля
1	ЗАЗ 1102	11	ВАЗ 2108	21	Daewoo-Tico
2	Daewoo-Lanos	12	ВАЗ 1111	22	ГАЗ 3302
3	ВАЗ 2107	13	Daewoo-Leganza	23	ВАЗ 2110
4	ГАЗ 2217	14	Porsche 914	24	ИЖ 2126
5	Daewoo-Nubira	15	ВАЗ 2109	25	Daewoo-Espero
6	ВАЗ 2123	16	ГАЗ 2705	26	ВАЗ 2120
7	ГАЗ 3110	17	ВАЗ 2112	27	Daewoo-Nexia
8	ВАЗ 2114	18	УАЗ 2206	28	ВАЗ 2329
9	ЛуАЗ 1102	19	ВАЗ 1111	29	ВИС 1705
10	ВАЗ 2131	20	УАЗ 31512	30	ВАЗ 21214

Таблиця 4 – Паспортні данні двигунів постійного струму

P_H , кВт	U_H , В	n_H , об/хв	$R_{я}$, Ом	$R_{об}$, Ом	$L_{я}$, мГн	$L_{об}$, мГн	m , кг
1	220	4000	2,52	92	48	480	10
1,2	220	4000	1,797	103	53	530	12
1,5	220	4000	1,77	44	19,5	200	15
2	220	4000	0,805	73	26	260	20
2,5	220	4000	0,788	39,4	9,3	110	25
3	220	2500	0,752	34,3	4,2	420	30
3,731	240	1220	0,6	240	12	120	40
4	220	4000	0,564	35	4,8	112	46
5,6	220	1000	0,26	58,75	10,2	102	56
6	220	2120	0,145	64,2	4,5	45	60
7,1	220	1500	0,092	54,6	5,5	55	75
8	220	950	0,125	51,936	5,3	53	80
9,5	220	2240	0,084	44,73	3,1	31	95
11	220	2240	0,044	39,268	2,6	26	110

4.3 Побудувати в програмі Simulink математичну модель заданого автомобіля з гібридною силовою установкою, яка додатково

містить тяговий електричний двигун постійного струму та його редуктора. В моделі необхідно врахувати масу тягових акумуляторних батарей, яка складає 70 кг.

4.4 Провести порівняльний аналіз динаміки розгону базового автомобіля та автомобіля з гібридною силовою установкою. Побудувати порівняльні графічні відображення в єдиній системі координат.

4.5 Провести порівняльний аналіз динамічних характеристик базового автомобіля та автомобіля з гібридною силовою установкою. Побудувати порівняльні графічні відображення в єдиній системі координат.

4.6 Провести порівняльний аналіз максимального ухилу, що може подолати базовий автомобіль та автомобіль з гібридною силовою установкою. Побудувати порівняльні графічні відображення в єдиній системі координат.

4.7 Зробити висновки про доцільність встановлення на даний автомобіль гібридної силової установки.

5. Приклад виконання курсової роботи

5.1 Вибір початкових даних

Виберемо для моделювання гібридної силової установки, як приклад, вітчизняний автомобіль “ЗАЗ-1102”. Автомобіль “ЗАЗ-1102” обраний для моделювання також тому, що перший гібридний транспортний засіб, який був створений на кафедрі автомобільної електроніки ХНАДУ, був саме на базі цього автомобіля.

Початкові дані для моделювання тягово-швидкісних характеристик автомобіля “ЗАЗ-1102” з гібридною силовою установкою наведені у табл. 5.

5.2 Моделювання автомобіля

Метою даної курсової роботи є порівняння тягово-швидкісних характеристик гібридного і базового автомобіля з ДВЗ. Тому проектуємо дві однакові моделі автомобілів, тільки до однієї з них підключаємо тяговий електричний двигун. Ця система і буде гібридним

автомобілем, яка при відключенні електричного двигуна, перетворюється на автомобіль з традиційним ДВЗ.

Таблиця 5 – Початкові дані для розрахунку

Модель автомобіля	ЗАЗ - 1102
1	2
Повна маса m , кг	710
Тип двигуна	бензиновий
Максимальна потужність $N_{E_{max}}$, кВт	37,5
Частота обертання вала при максимальній потужності n_N , об/хв.	5300
Передавальні числа: коробки передач U_{k1} U_{k2} U_{k3} U_{k4} U_{k5} головної передачі U_0	3,454 2,056 1,333 0,969 0,730 3,875
Шини	155-70R13
Статичний радіус коліс $r_{ст}$, м	0,271
Габаритні розміри : ширина B_r , м висота H_r , м	1,554 1,410
КПД трансмісії, η	0,9
Коефіцієнт опору повітря k , Nc^2/m^4	0,29
Час розгону до 100 км/год, t_p , с	17

Для створення моделі автомобіля необхідно побудувати підсистеми усіх його основних блоків. Для цього моделюємо в блоці автомобіль підсистеми “engine” (двигун), “gearbox” (коробка перемикачів передач), “U0” (головна передача), “Rk” (ведучі колеса). Побудова моделі систем зводиться до того, щоб за допомогою “Simulink” зібрати схему, що буде відображати формулу, яка описує заданий вузол. Крім того в модель вписуються параметри автомобіля, тобто в модель підставляються потужність двигуна, передаточні числа коробки передач, головної передачі та інші дані, які були вибрані з технічних характеристик автомобіля.

5.2.1 Побудова моделі ДВЗ. Створюємо модель поршневого двигуна внутрішнього згоряння (підсистема engine) працюючого на зовнішній швидкісній характеристиці, використовуючи емпіричну формулу, що дозволяє по відомих координатах однієї точки швидкісної характеристики ($N_{E_{max}}$ та n_N) відтворити всю криву потужності:

$$N_e = N_{e_{max}} \left[A_1 \frac{n}{n_N} + A_2 \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 - \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right], \quad (6)$$

де N_e – поточне значення потужності двигуна, відповідне частоті обертання вала двигуна, кВт;

n – частота обертання вала ДВЗ, об/хв.;

n_N – частота обертання при максимальній потужності, об/хв.;

$N_{E_{max}}$ – максимальна потужність двигуна, кВт;

A_1, A_2 – емпіричні коефіцієнти, що характеризують тип двигуна внутрішнього згоряння. Для бензинових двигунів $A_1 = A_2 = 1,0$.

Визначивши N_e для любых значень n , модель рахує відповідне значення обертаючого моменту двигуна M_e .

$$M_e = 9550 \frac{N_e}{n}, \quad (7)$$

Структура моделі двигуна внутрішнього згоряння (підсистеми “engine”) представлена на рис. 3.

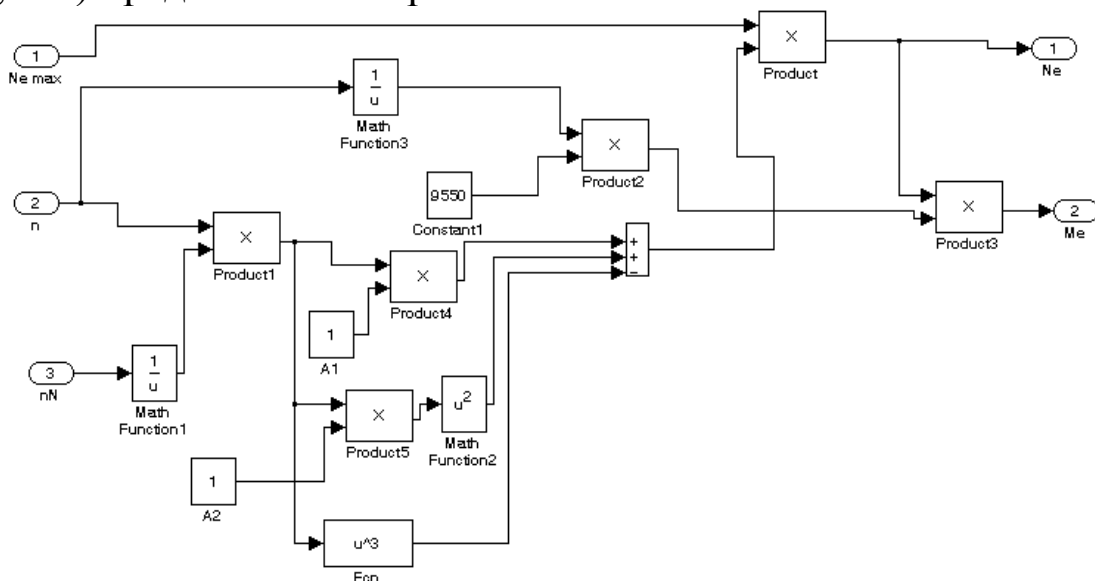


Рисунок 3 – Схема структурна моделі ДВЗ (підсистема engine)

5.2.2 Побудова моделі трансмісії. Блоки “gearbox”, U_0 , и R_k – моделі коробки передач, головної передачі та ведучих коліс, визначають тягове зусилля на ведучих колесах P_K та швидкість автомобіля V .

Розрахуємо тягове зусилля на ведучих колесах

$$P_K = \frac{M_e U_{ki} U_o \eta}{r_{\partial}}, \quad (8)$$

де U_{ki} - передаточне число коробки передач

U_0 - передаточне число головної передачі

η – ККД трансмісії,

r_{∂} - динамічний радіус колеса, який в нормальних умовах руху приймають рівним, r_{CT} ,

Розрахуємо швидкість автомобіля V , км/год., яка пов'язана з частотою обертання валу ДВЗ n наступною залежністю:

$$V = 0,377 \cdot \frac{r_k n}{U_{ki} U_o}, \quad (9)$$

де r_k - радіус кочення колеса, що дорівнює статичному радіусу.

Блок моделі коробки передач “gearbox” наведено на рис. 4.

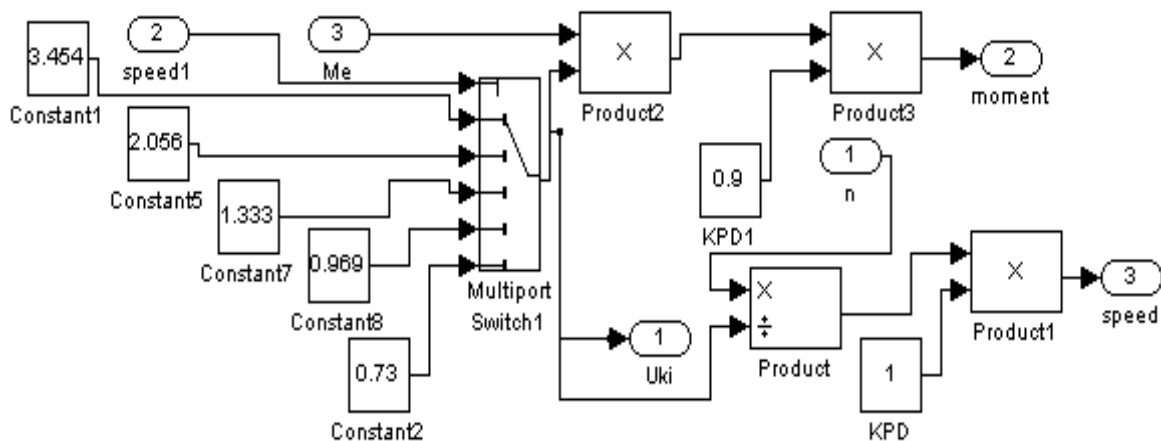


Рисунок 4 – Схема структурна моделі коробки передач (підсистема gearbox)

В даній підсистемі константи – це передаточні числа коробки передач, які вибираються, в залежності від конкретного автомобіля, з його технічних характеристик.

При моделюванні коробки передач треба звернути увагу на те, що вмикання задньої передачі в даній курсовій роботі не розглядається. Передачі перемикаються за допомогою перемикача “MultiportSwitch1”.

Аналогічно будуємо схему головної передачі, константою якої є передаточне число головної передачі. Схему головної передачі зображено на рис. 5.

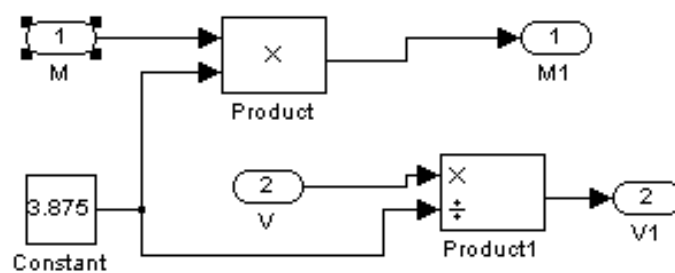


Рисунок 5 – Схема структурна моделі головної передачі (підсистема U0)

Будуємо модель системи ведучих коліс, де r_{st} – це статичний радіус колеса. В системі “automobile” зображено, як підсистему Rk. Модель ведучих коліс зображено на рис. 6.

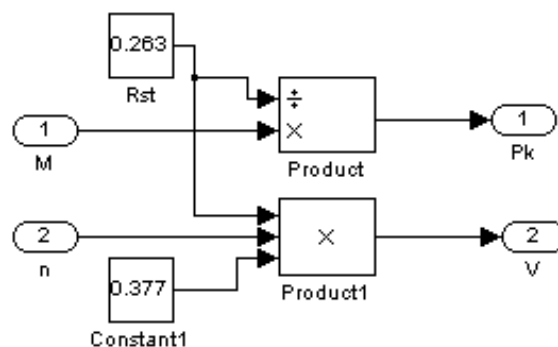


Рисунок 6 – Схема структурна моделі ведучих коліс (підсистема Rk)

5.2.3 Моделювання сил, які діють на автомобіль.

Силу сумарного дорожнього опору автомобіля визначаємо по формулі

$$P_{\psi} = \psi G, \quad (10)$$

де $G = gm$ - повна вага автомобіля,
 $g = 9,81$ м/с² - прискорення вільного падіння.

В розрахунках не враховується вплив швидкості руху автомобіля на коефіцієнт опору коченню, в зв'язку з чим, вважаємо, що $\psi = const$.

$$P_w = \frac{kFv^2}{3,6^2}, \quad (11)$$

де k – коефіцієнт опору повітря,
 F - лобова площа,
 v - швидкість автомобіля, км/год.

Лобова площа може бути визначена по кресленню автомобіля, а при його відсутності – приблизно по формулі

$$F = \alpha B_r H_r, \quad (12)$$

де α - коефіцієнт заповнення площі.

Для легкових автомобілів коефіцієнт заповнення площі $\alpha = 0,78 \dots 0,8$. Приймаємо $\alpha = 0,8$, тоді лобова площа автомобіля буде складати $F = 1,86$.

Динамічний фактор автомобіля D визначається для різних передач і швидкостей руху по формулі:

$$D = \frac{P_k - P_w}{G}, \quad (13)$$

Для визначення динамічного фактору і сили опору повітря створюємо підсистему D (рис. 7)

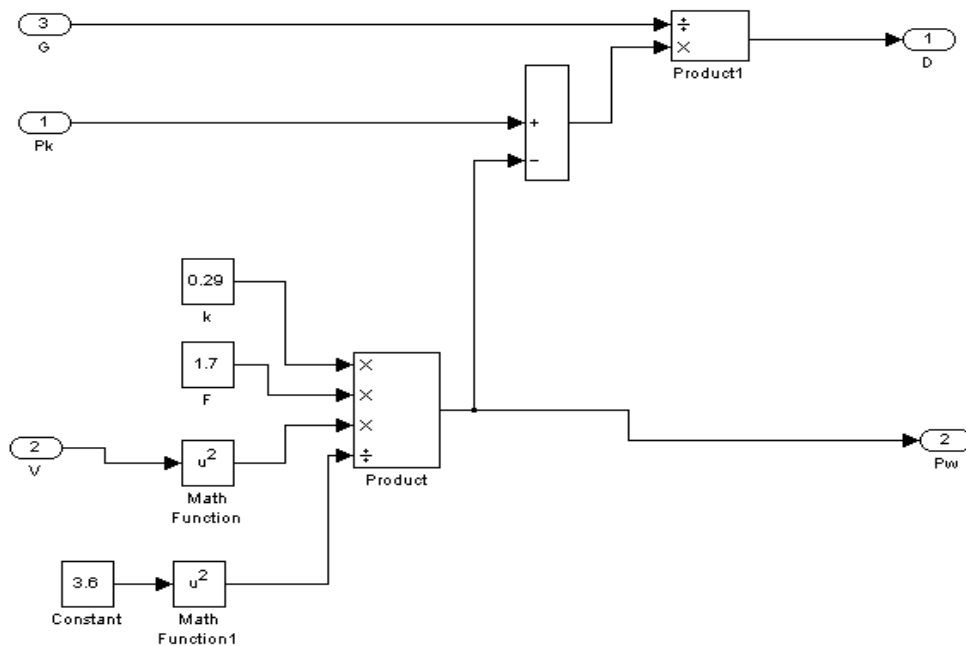


Рисунок 7 – Схема структурна моделі для визначення динамічного фактору і сили опору повітря (підсистема D)

Крім того, за допомогою підсистеми D визначається сумарний дорожній опір, який може подолати автомобіль ψ_{\max} .

$$\psi_{\max} = D_{\max} \quad (14)$$

$$i_{\max i} = (\psi_{\max i} - f) \cdot 100\% \quad (15)$$

де $i_{\max i}$ - максимальний повздовжній ухил дороги, який може подолати автомобіль, f – опір коченню.

Величина коефіцієнту сумарного дорожнього опору ψ_v залежить від типу покриття та його стану. На дорогах з твердим покриттям опір коченню обумовлено головним чином деформаціями шини. При збільшенні числа дорожніх нерівностей коефіцієнт опору коченню зростає. На деформованих дорогах коефіцієнт опору коченню визначається деформаціями шини і дороги. В цьому випадку він залежить не тільки від типу шини, але і від глибини колії та стану ґрунту.

Значення коефіцієнта опору коченню при рекомендованих рівнях тиску повітря і навантаження на шину і середньої швидкості руху на різних дорогах наведено у табл. 8.

Таблиця 8 – Коефіцієнт опору коченню

Дорога	Стан покриття	Коефіцієнт опору коченню
З асфальтобетонним або цементобетонним покриттям	гарний	0,007...0,015
	задовільний	0,015...0,02
З щебеним покриттям	гарний	0,02...0,025
Булизна	гарний	0,025...0,03
Ґрунтова	суха, укочена	0,025...0,03
Пісок	суха, укочена	0,1...0,3
Обмерзла	лід	0,015...0,03
Вкрита снігом	укочена	0,03...0,05

При зміні швидкості руху в інтервалі 0...50 км/год. коефіцієнт опору коченню змінюється незначно і його можна вважати постійним в зазначеному діапазоні швидкостей. При підвищенні швидкості руху за межами зазначеного інтервалу коефіцієнт опору коченню істотно збільшується внаслідок зростання втрат енергії в шині на тертя.

Для визначення максимального ухилу створюємо підсистему “Slope” (рис. 9).

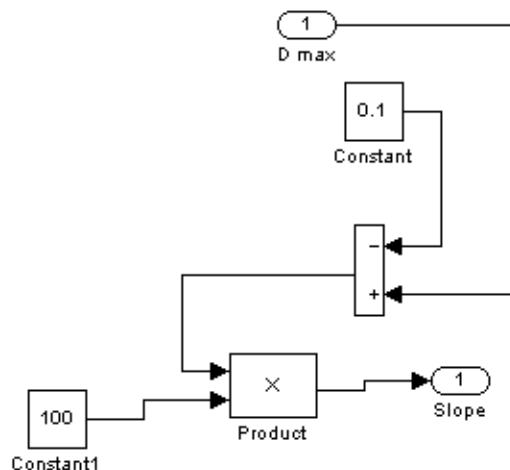


Рисунок 9 – Схема структурна підсистеми для визначення максимального ухилу, що може подолати автомобіль (підсистема “Slope”)

Крім динамічного фактору і сили опору повітря необхідно розрахувати силу сумарного дорожнього опору. Для цього будуємо підсистему $P_w + P_{ksi}$ (рис. 10).

Схема структурна моделі для визначення сили сумарного дорожнього опору автомобіля (підсистема $P_w + P_{ksi}$) наведена на рис. 10.

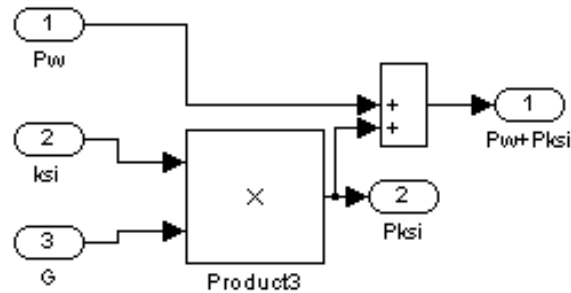


Рисунок 10 – Схема структурна моделі для визначення сили сумарного дорожнього опору (підсистема $P_w + P_{ksi}$)

Час розгону одержуємо за допомогою блоків “math function” і “integrator” як інтеграл функції

$$t = \int_{v^1}^{v^2} \frac{1}{j} dv, \quad (16)$$

Прискорення j для різних передач і швидкостей визначають по значенням динамічного фактору D автомобіля, використовуючи формулу

$$j = (D - \psi) \frac{g}{\delta}, \quad (17)$$

де $\delta = 1,04 + 0,04 U_{kj}^2$ - коефіцієнт для врахування інерції мас.

Для того, щоб визначити прискорення автомобіля, побудуємо систему моделі для визначення прискорення автомобіля.

Схема структурна моделі для визначення прискорення автомобіля (підсистема J) наведена на рис. 11.

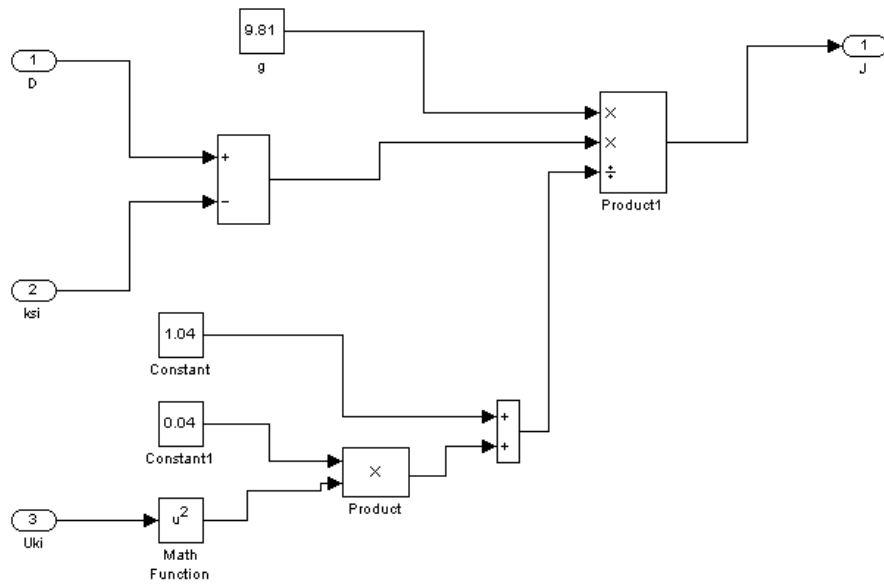


Рисунок 11 – Схема структурна моделі для визначення прискорення автомобіля (підсистема J)

Поєднавши приведені вище схеми, створюємо систему “automobile”, яка наведено на рис. 12.

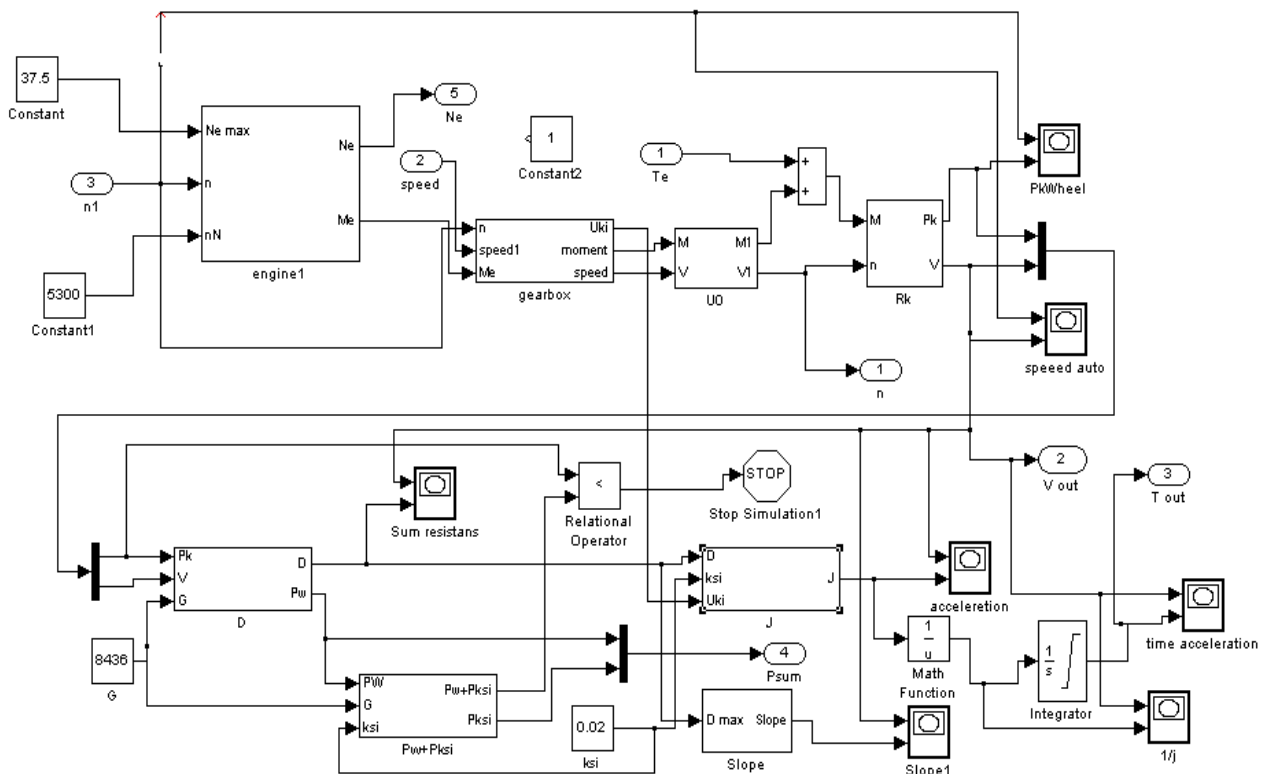


Рисунок 12 – Схема структурна системи “automobile”

5.2.4 Модель системи керування. Для зміни оборотів двигуна і перемикавання передач в процесі моделювання створюємо підсистему “driver”, що має 3 зовнішні входи для задавання обертів ДВЗ у момент перемикавання передач і 2 виходи “speed” – діюча передача і “turns” – поточне значення оборотів двигуна. Лінійно зростаючі оберти двигуна внутрішнього згоряння задаються блоком “first” (ramp). Для запуску процесу перемикавання передач використовуються схеми порівняння “hit crossing”

У момент, коли спрацьовує блок “hit crossing”, відбувається запуск підсистеми тригера “triggered subsystem” і за допомогою блоків суматора і n_{max} відбувається зміна обертів двигуна до значення заданого на зовнішньому вході “from first to second”. Крім того одиничний імпульс схеми порівняння запускає підсистему “1to2”, що приводить до збільшення на 1 діючої передачі. Одночасно з цим одиничний сигнал, який поступає на вхід блоку “enabled and triggered subsystem” дозволяє роботу наступного каскаду схеми перемикавання передач.

Модель системи керування (підсистема “driver”) наведено на рис. 13.

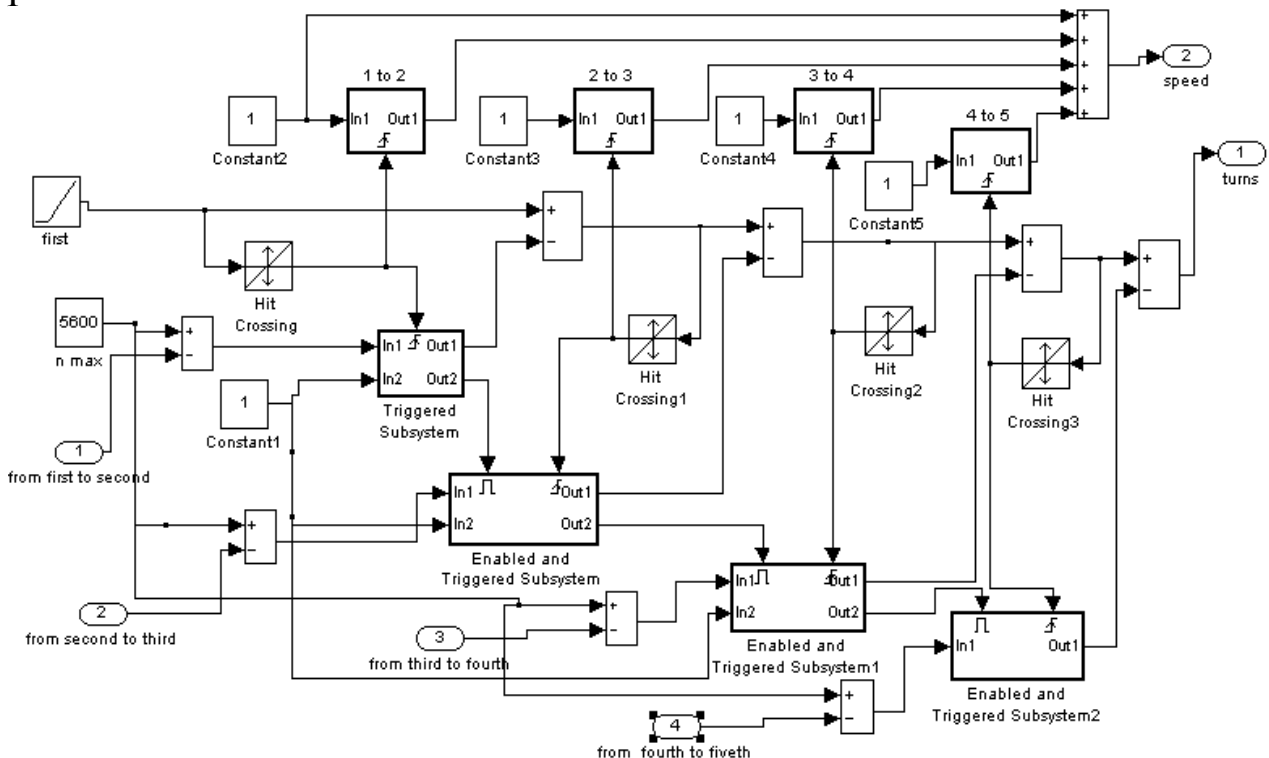


Рисунок 13 – Схема структурна моделі системи керування (підсистема “driver”)

Об'єднаємо модель автомобіля та модель системи керування (рис. 14).

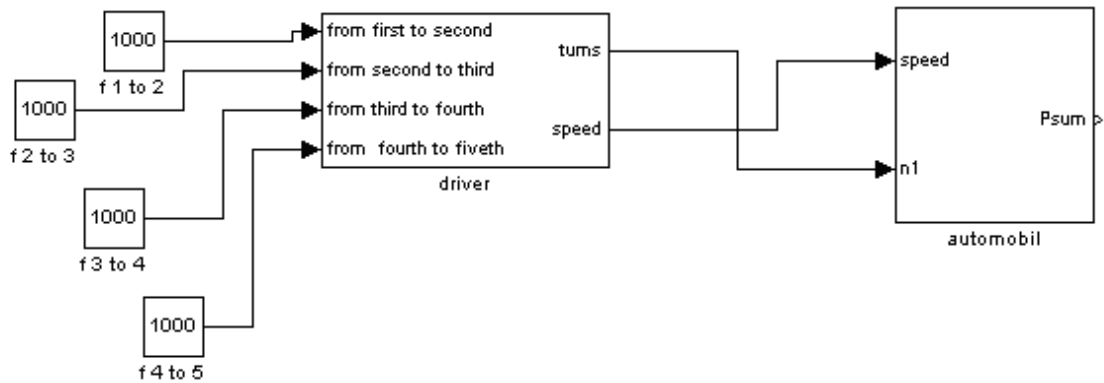


Рисунок 14 – Схема структурна моделі автомобіля та системи керування

Спочатку оберти двигуна внутрішнього згоряння, при переході на вищу передачу, встановлюємо вільно. В результаті моделювання отримаємо наступний графік прискорень автомобіля при не налаштованій системі керування (рис. 15).

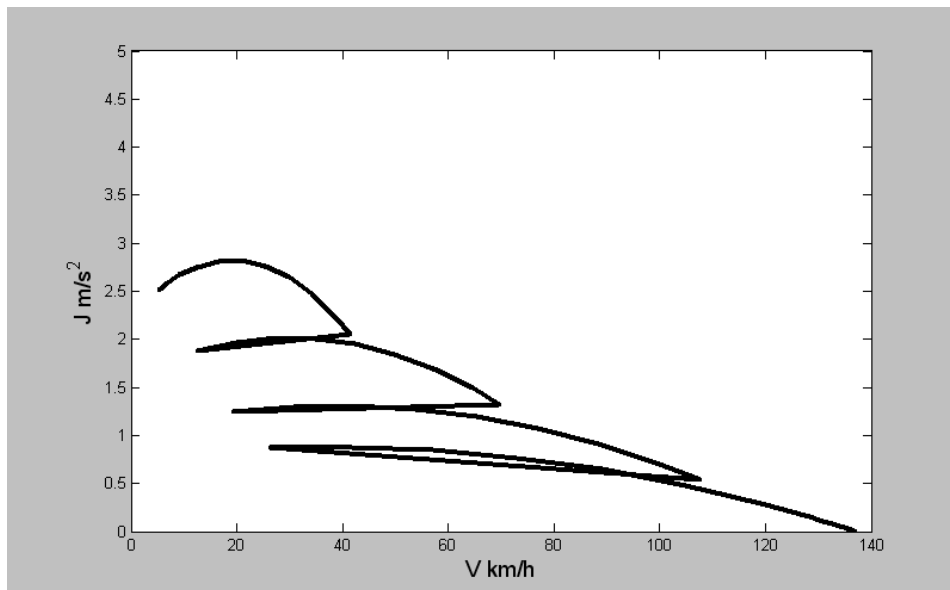


Рисунок 15 – Графік прискорень автомобіля при не налаштованій системі керування

Підбираємо параметри системи керування (значення констант “f 1 to 2, f 2 to 3, f 3 to 4”) так, щоб перехід на вищу передачу здійснювався при рівних прискореннях.

Графік прискорення автомобіля “ЗАЗ-1102” при налаштованій системі керування буде мати вигляд наведений на рис. 16.

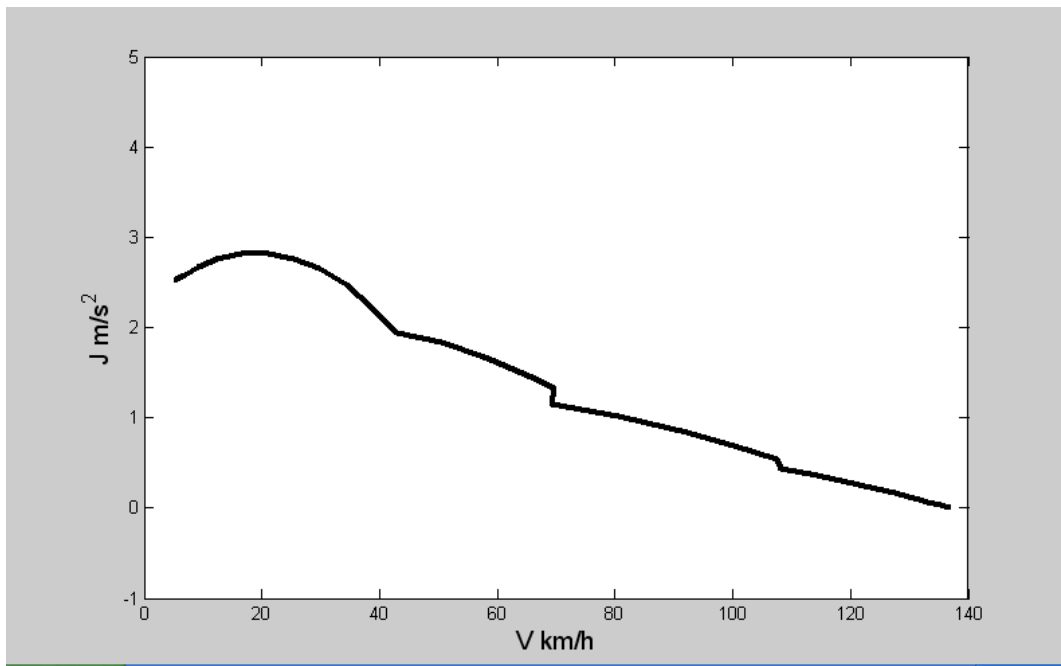


Рисунок 16 – Графік прискорення автомобіля “ЗАЗ-1102” при налаштованій системі керування

Після вибору моментів перемикання передач вибираємо масштаб інтегрування величин, зворотних прискоренням. Для цього проводимо параметричний аналіз системи моделювання шляхом змінювання параметрів “Slope” блока “first” в підсистемі “driver” до тих пір, доки графік часу розгону автомобіля ні співпадає з його паспортними даними.

Час розгону автомобіля “ЗАЗ-1102” до 100 км/год. згідно паспортним даним складає 17 с. Приклад скорегованого графіку часу розгону автомобіля “ЗАЗ-1102” на двигуні внутрішнього згоряння наведена на рис. 17.

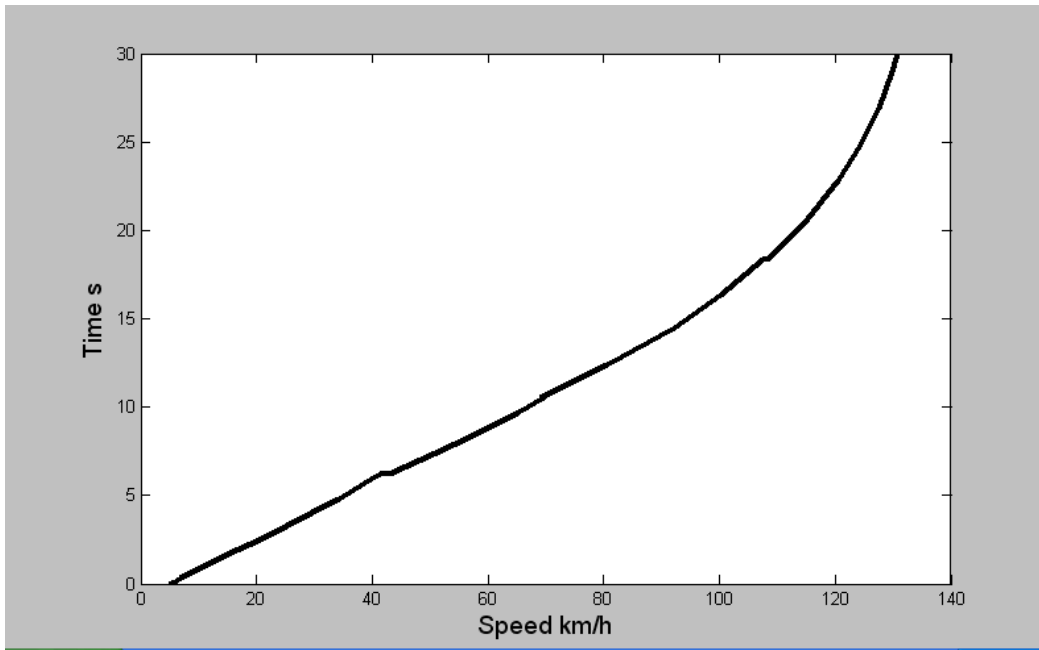


Рисунок 17 – Графік часу розгону автомобіля

5.2.5 Моделювання електричного двигуна. Тяговий електричний двигун обираємо по мінімально необхідній потужності для руху автомобіля до швидкості 40 км/год.

$$N_{need} = N_{\psi} + N_w \quad (18)$$

де N_{ψ} - потужність, яка витрачається на подолання сумарного дорожнього опору

$$N_{\psi} = \frac{P_{\psi} V}{3600} \quad (19)$$

де N_w - потужність, яка витрачається на здолаття опору повітря

$$N_w = \frac{P_w V}{3600} \quad (20)$$

Для знаходження необхідної потужності електричного двигуна зберемо підсистему “necessary power” (рис. 18), в якій і визначимо необхідну потужність тягового електричного двигуна для нашого автомобіля.

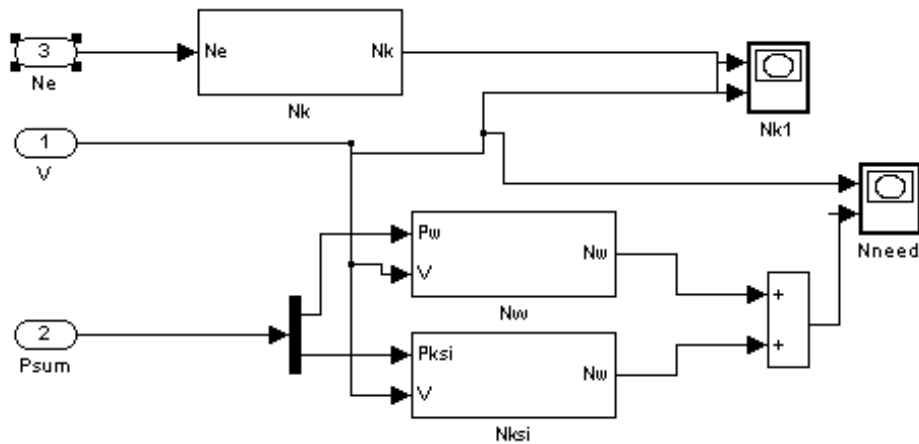


Рисунок 18 – Схема структурна моделі для визначення потужності електричного двигуна (підсистема “necessary power”)

Промодельюємо та отримуємо графік мінімально необхідної потужності тягового електричного двигуна для руху автомобіля по горизонтальній поверхні с заданої швидкістю, який показаний на рис. 19.

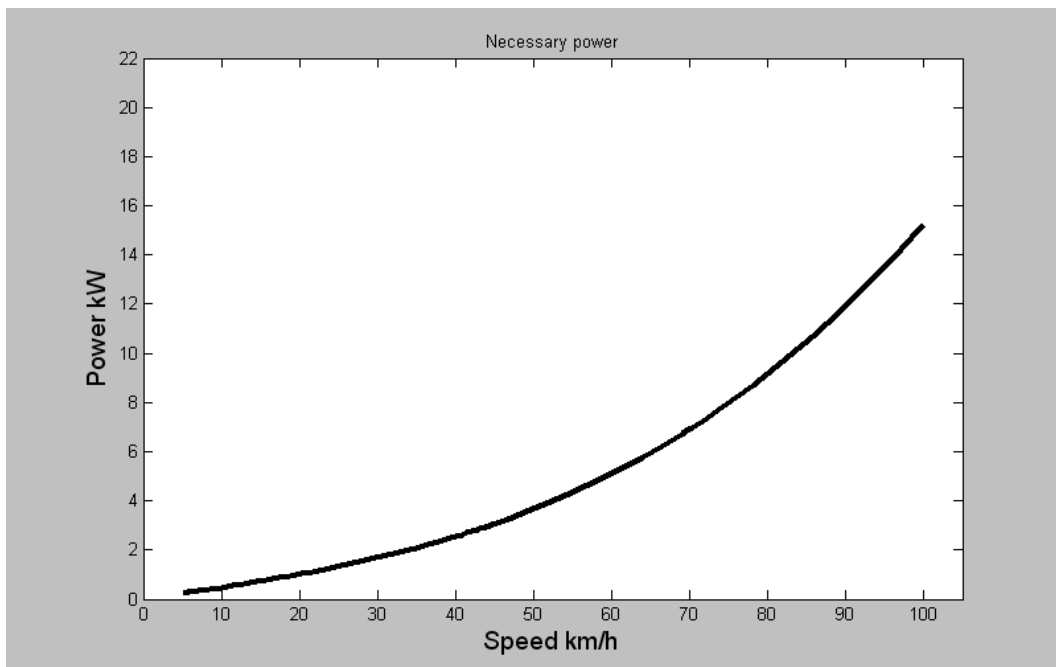


Рисунок 19 – Мінімумально необхідна потужність для руху с заданої швидкістю

За допомогою графіка (рис. 19) визначимо потужність тягового електричного двигуна, який треба використовувати в автомобілі з гібридною силовою установкою. Для цього по осі швидкості знай-

демо відмітку 40 км/год., проведемо лінію до перетину з графіком, потім спроекуємо точку перетину на вісь потужності. Визначення тягового електричного двигуна проводиться згідно табл. 4 шляхом корекції отриманої потужності у бік збільшення.

В результаті встановлено, що для рівномірного руху автомобіля “ЗАЗ-1102” із швидкістю 40 км/год. мінімально необхідна потужність тягового електричного двигуна складає 3.8 кВт, таким чином з табл. 4 вибираємо тяговий електричний двигун з потужністю 4000 Вт.

Проведемо визначення параметрів моделі за паспортними даними електричного двигуна згідно табл. 5.

Початкові дані: $P_{ном} = 4$ кВт, $U_n = 220$ В, $n = 4000$ об/хв, $R_{я} = 0.564$ Ом, $R_{об} = 35$ Ом, $L_{я} = 4,8$ мГн = 0.0048 Гн.

Визначимо взаємну індуктивність обмоток збудження та якоря ($L_{аф}$). Для цього проведемо наступні розрахунки:

- знаходимо струм обмотки збудження

$$I_{\phi} = \frac{U_n}{R_{я}} = \frac{220}{35} = 6,285 A \quad . (21)$$

- визначаємо. струм, який споживає електричний двигун в номінальному режимі

$$I_{\partial в} = \frac{P_{ном}}{U_n} = \frac{4000}{220} = 18.18 A. \quad (22)$$

- знаходимо струм якоря

$$I_{я} = I_{\partial в} - I_{\phi} = 18,18 - 6,285 = 11,8968 A \quad (23)$$

- визначаємо проти ЕРС , що виникає в обмотці якоря

$$E_0 = U_n - I_{я} \cdot R_{я} = 220 - 11,896 * 0,564 = 213,29 В. \quad (24)$$

- знаходимо взаємну індуктивність

$$L_{a\phi} = \frac{E_0}{\omega \cdot I\phi} = \frac{213,29}{418,879} * 6,285 = 0,08 \text{ Гн}, \quad (25)$$

$$\text{де } \omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi * \frac{4000}{60} = 418,879 \text{ рад / с.}$$

Визначивши всі необхідні параметри тягового електричного двигуна, необхідно для його роботи синхронізувати його частоту із зовнішньою частотою двигуна внутрішнього згорання автомобіля. Для цього ми створюємо підсистему “n/w”, показану на рис. 20, яка синхронізує частоти.

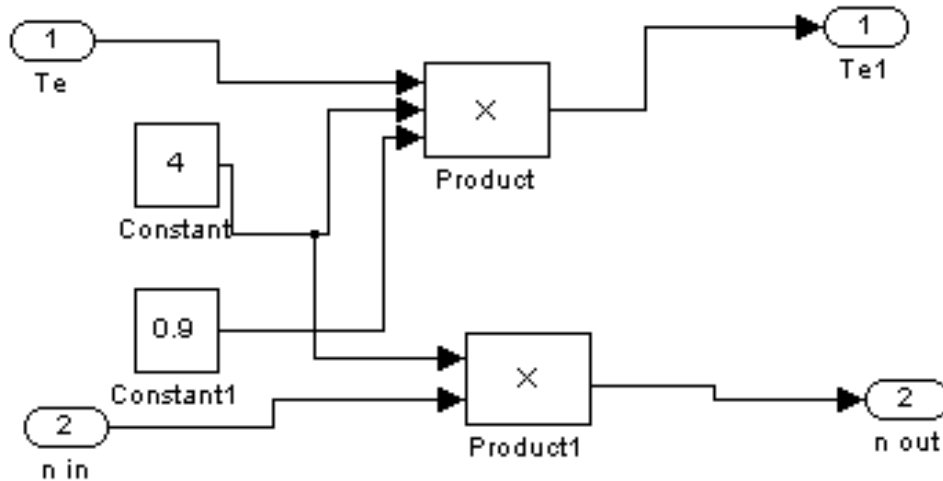


Рисунок 20 – Схема структурна системи синхронізації частот (підсистема “n/w”)

Синхронізація частоти тягового електричного двигуна з зовнішньою частотою проводиться за формулою

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (26)$$

Після синхронізації частоти із зовнішньою частотою двигуна внутрішнього згорання, підсистема моделі тягового електричного двигуна має вигляд, наведений на рис. 21.

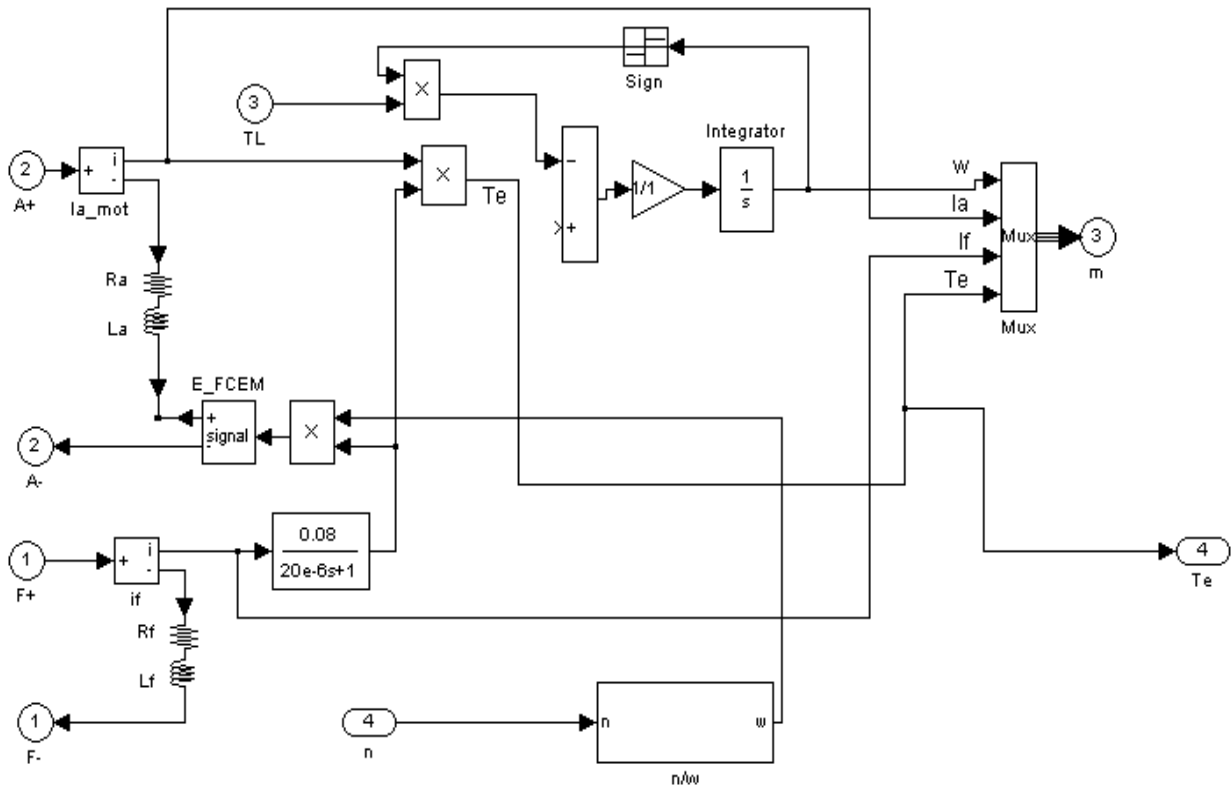


Рисунок 21 – Схема структурна тягового електричного двигуна

5.2.6 Моделювання порівняльних характеристик базового та гібридного автомобілів. Для моделювання автомобіля з гібридною силовою установкою підключимо розрахований і змодельований нами тяговий електричний двигун до побудованої системи “automobile”. Така система імітує сумісну роботу ДВЗ та електричного двигуна у процесі розгону автомобіля. Створену систему назовемо “Hybrid”.

Схема структурна гібридного автомобіля (система “Hybrid”) наведено на рис. 22.

Порівняльна характеристика динаміки розгону базового автомобіля (система “automobile”) з динамікою розгону автомобіля, який оснащений гібридною силовою установкою (система “Hybrid”) наведено на рис. 23.

Результати порівняльного моделювання показують, що незважаючи на збільшення маси гібридного автомобіля та відносно малої потужності електричного двигуна постійного струму (4 кВт), час розгону до 100 км/год знизився на 2 с.

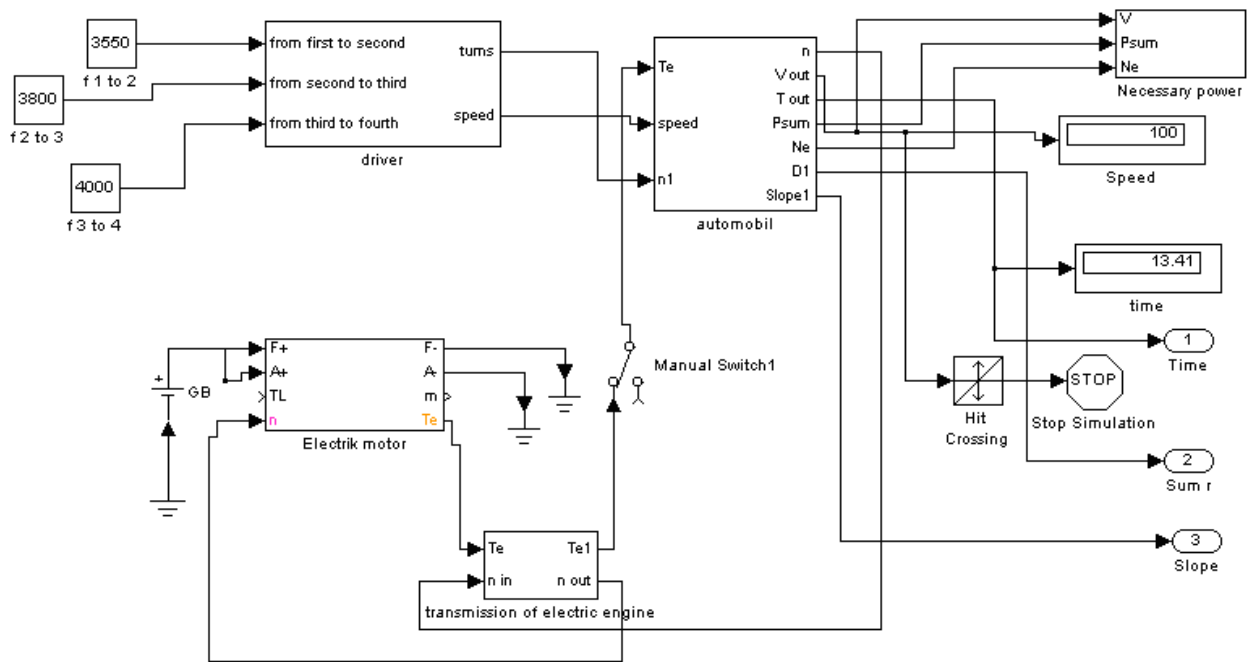


Рисунок 22 – Схема структурна автомобіля з гібридною силовою установкою (система “Hybrid”)

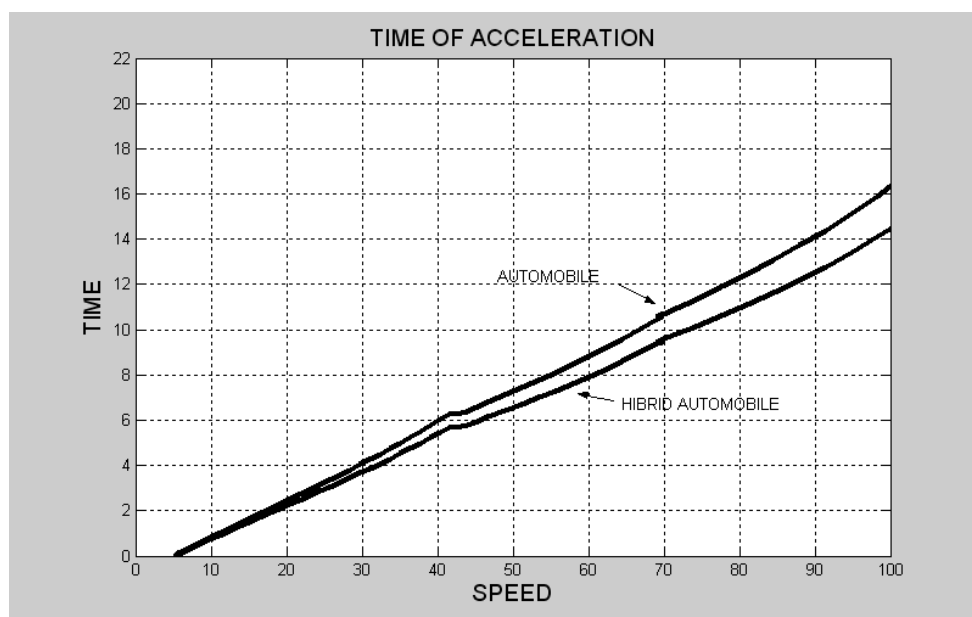


Рисунок 23 – Графік порівняння динаміки розгону базового та гібридного автомобілів

На рис. 24 показана динамічна характеристика гібридного автомобіля, у порівнянні з базовим.

Результати порівняльного моделювання динамічних характеристик базового та гібридного автомобілів показує, що автомобіль з

гібридною силовою установкою здатний подолати набагато більший дорожній опір, ніж базовий автомобіль.

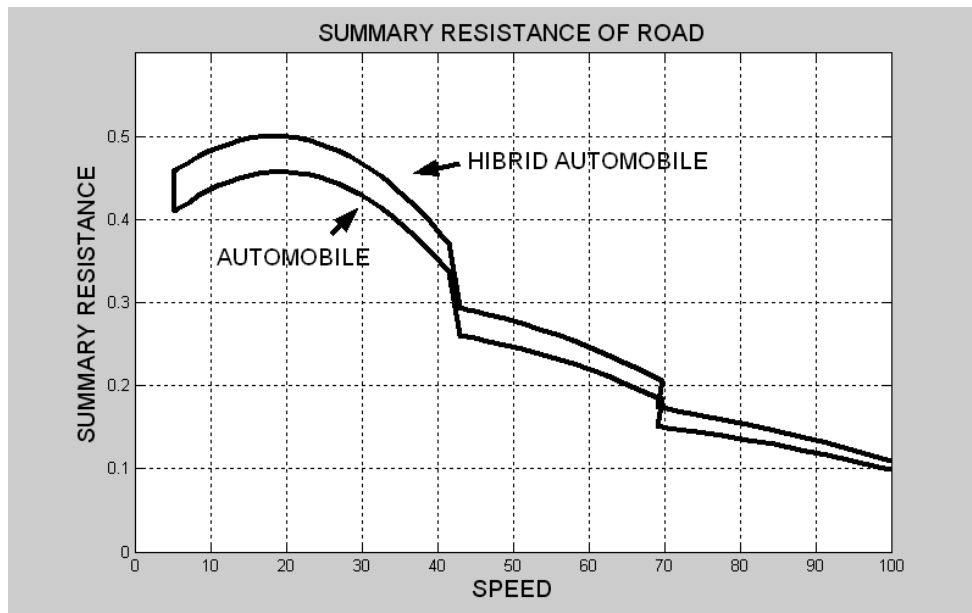


Рисунок 24 – Графік порівняння динамічних характеристик гібридного та базового автомобілів

На рис. 25 показано порівняльний аналіз максимального по-вздовжнього ухилу автомобільної дороги, який в змозі подолати гібридний та базовий автомобіль.

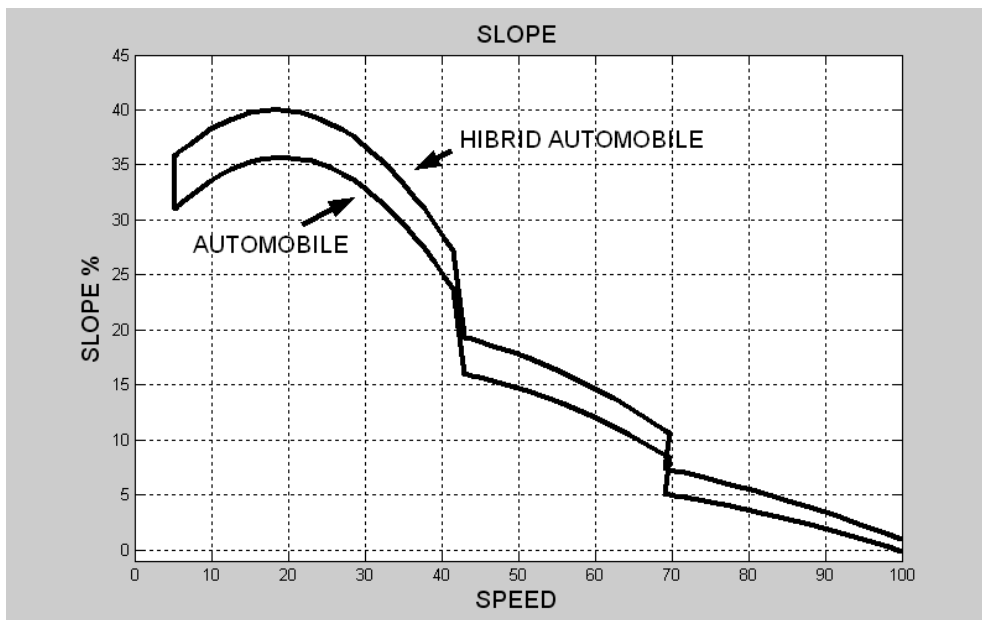


Рисунок 25 – Графік порівняння максимального ухилу, що можуть подолати гібридний та базовий автомобіль

Результати порівняльного моделювання максимального по-
вздовжнього ухилу автомобільної дороги, який в змозі подолати гі-
бридний та базовий автомобіль показують, що автомобіль з гібрид-
ною силовою установкою здатний подолати більш круті підйоми, не
знижуючи швидкості, та без перемикання коробки передач на ниж-
чу передачу.

Таким чином, в результаті побудована математична модель ав-
томобіля “ЗАЗ-1102” та проведено порівняння динамічних характе-
ристик базового та гібридного автомобілів. В результаті виконання
ми дійшли до висновку, що автомобіль з гібридною силовою уста-
новкою, в порівнянні з базовою моделлю, є більш потужним, надій-
ним, екологічно чистішим, більш економним, та більш швидким
транспортним засобом. Він здатний легше і набагато ефективніше
долати максимально допустимі ухили без перемикання передач.
Крім того, швидкість розгону до 100 км/год. автомобіля з гібридною
силовою установкою зменшилася на 2 с, незважаючи на збільшення
маси автомобіля.

ВИСНОВКИ

В курсовій роботі проведено порівняльне моделювання тягово-швидкісних характеристик автомобіля з гібридною силовою установкою та базового автомобіля. Побудовані відповідні моделі: двигуна внутрішнього згорання, трансмісії, сил, які діють на автомобіль, системи керування, тягового електричного двигуна та проведено моделювання порівняльних характеристик базового та гібридного автомобілів.

В результаті виконання курсової роботи студенти отримують навички моделювання електромеханічних систем та процесів в програмі Simulink шляхом проведення проектування моделі автомобіля з гібридною силовою установкою. В результаті моделювання отримані відповідні порівняльні тягово-швидкісні характеристики базового та конверсійного автомобіля та визначити доцільність установки тягового електричного двигуна. Проведено порівняння тягово-швидкісних властивості базового автомобіля з автомобілем, який використовує гібридну силову установку показує доцільність використання на цьому автомобілі електричного привода.

В результаті побудови моделі автомобіля “ЗАЗ-1102” та порівняння динамічних характеристик базового та гібридного автомобілів ми дійшли до висновку, що автомобіль з гібридною силовою установкою, в порівнянні з базовою моделлю, є більш потужним, надійним, екологічно чистішим, більш економним, та більш швидким транспортним засобом. Він здатний легше і набагато ефективніше долати максимально допустимі ухили без перемикання передач. Крім того, швидкість розгону до 100 км/год. автомобіля з гібридною силовою установкою зменшилася на 2 с, незважаючи на збільшення маси автомобіля.

Рекомендована література

1. Базова література

1. Шинкаренко, В. Ф. Моделювання електромеханічних систем: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні машини і апарати» / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська, В. В. Котлярова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 253 с.

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

3. Modeling and Electrothermal Simulation of SiC Power Devices Using Silvaco ATLAS TCAD by Bejoy N Pushpakaran & Stephen B Bayne (Texas Tech University, USA), 2019, 464pp.

4. Dynamic systems : modeling, simulation, and control [Kluever, Craig A.](#) Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2020. <https://nu.insignails.com/library/ItemDetail?l=All&i=96847&ti=2&subid=0>

2. Допоміжна література

1. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.

2. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. – Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В.К. : НАУ, 2017. – 392 с.

3. Eshkabilov, S.L. (2020). Electromechanical and Mechanical Systems. In: Practical MATLAB Modeling with Simulink. Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5799-9_10

4. Calculation and graphic work of the «Modeling of electromechanical systems» discipline [Electronic resource]: Tutorial for students studying for Specialty 141 «Electricity, electrical engineering and electromechanics», educational program «Electric Machines and Apparatus» / Igor Sikorsky KPI; compilers: Vasyl Shynkarenko, Anna Shymanska, Victoria Kotliarova . – Electronic text data (1 file: 899 kB). – Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2021. – 41 p

3. Інформаційні ресурси

1. Електронний курс (1 частина) з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» на освітній платформі ХНАДУ; уклад.: О. П. Смирнов. Посилання <https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=1289>

2. Електронний курс (2 частина) з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» на освітній платформі ХНАДУ; уклад.: О. П. Смирнов. Посилання <https://dl2022.khadi-kh.com/course/view.php?id=2312>

3. Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем" : для студ. всіх форм навчання спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" [Електронний ресурс] / М-во освіти і науки України, ХНАДУ ; уклад.: О. П. Смирнов, А. О. Борисенко ; відп. за вип. О. В. Бажинов. - Харків : ХНАДУ, 2020. - 37 с. Посилання ftp://194.44.189.147/libfulltxt/UCHLIB/ER/2020/MV_KR_Modeliuvanni_a_2020.pdf

4. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем" : для студ. всіх форм навчання спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" [Електронний ресурс] / М-во освіти і науки України, ХНАДУ ; уклад.: О. П. Смирнов, А. О. Борисенко ; відп. за вип. О. В. Бажинов. - Харків : ХНАДУ, 2020. - 36 с. Ч. 1. Посилання ftp://194.44.189.147/libfulltxt/UCHLIB/ER/2020/MV_LAB_Modeliuvannia_1_2020.pdf

5. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем" : для студ. всіх форм навчання спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" [Електронний ресурс] / М-во освіти і науки України, ХНАДУ ; уклад.: О. П. Смирнов, А. О. Борисенко ; відп. за вип. О. В. Бажинов. - Харків : ХНАДУ, 2020. - 36 с. Ч. 2. Посилання ftp://194.44.189.147/libfulltxt/UCHLIB/ER/2020/MV_LAB_Modeliuvannia_2_2020.pdf

ЗМІСТ

с.

Загальні положення.....	5
Зміст та вказівки до виконання	8
1 Основи побудови математичних моделей в програмі Simulink.....	8
2 Порівняльний аналіз основних властивостей ДВЗ та електричного двигуна.....	9
3 Синергетика двигунів.....	11
4 Завдання на виконання курсової роботи.....	13
5 Приклад виконання курсової роботи.....	15
5.1 Вибір початкових даних.....	15
5.2 Моделювання автомобіля.....	16
Висновки.....	36
Список літератури.....	37