«Обгрунтування параметрів гібридної силової установки на базі вітчизняного легкового автомобіля»

Шифр роботи: «ГібридСЕНС»

2020/2021 н.р.

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи

Глобальне потепління, токсичне і шумове забруднення міст в результаті експлуатації автомобільного транспорту обумовили стрімкий розвиток технологій гібридного та суто електричного приводу автомобілів. На сьогодні усі провідні автомобільні фірми запропонували нові конструкції електромобілів і гібридів, причому деякі з них оголосили відмову найближчим часом від розвитку технологій, пов'язаних з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ).

В розвитку гібридних приводів превалює тенденція зменшення потужності двигуна внутрішнього згоряння за рахунок збільшення потужності електричного двигуна ї ємності акумулятора, виробництва так званих Plug-in гібридів. Існують технології переобладнання існуючих автомобілів тяговими електричними двигунами замість ДВЗ.

Питання, що пов'язані з розробкою і впровадженням гібридних технологій є закритими, опублікована вкрай обмежена і недостатня інформація в технічній літературі. Особливо це стосується обґрунтування вибору режимів роботи ДВЗ і електричного двигуна у складі гібридної силової установки.

Метою роботи є обгрунтування параметрів конструкції і режимів роботи елементів гібридної силової установки на базі вітчизняного автомобіля ЗАЗ-СЕНС.

Задачі дослідження:

1. Визначення потрібних параметрів силової установки автомобіля в умовах експлуатації

2. Розробка схеми гібридної силової установки, вибір параметрів її елементів

3. Обгрунтування режимів роботи елементів гібридної установки.

Використана методика дослідження.

В роботі використана методика ХНАДУ для визначення параметрів гібридної силової уставноки на режимах випробувального циклу NEDC. Для

визначення параметрів двигуна внутрішнього згоряння на режимах зовнішньої швидкісної характеристики застосовано емпіричну залежність Колчина А.И. Демидова В.П. Характеристика потужності електричного двигуна описана лінійними математичними залежностями. Параметри планетарного редуктора розраховані за відомими з теорії механізмів і машин залежностями

Загальна характеристика роботи: 29 с., 17 рис., 1 табл., 9 джерел інформації

ЗМІСТ

Вступ…… 3
1. Актуальність проблеми……. 4
2. Визначення параметрів силової установки за режимами випробувального циклу NEDC……. 7
2.1. Методика дослідження…….. 7
2.2. Аналіз результатів дослідження…… 10
3. Розробка схеми гібридної силової установки і аналіз режимів її роботи……. 14
3.1 Розробка схеми гібридної силової установки……. 14
3.2. Визначення параметрів ДВЗ і тягового електричного двигуна/генератора при роботі з максимальним навантаженням…….. 17
3.3. Режими роботи елементів гібридної силової установки…….. 20
Висновки…… 28
Список використаної літератури…… 29

ВСТУП

Глобальне потепління, токсичне і шумове забруднення міст в результаті експлуатації автомобільного транспорту обумовили стрімкий розвиток технологій гібридного та суто електричного приводу автомобілів. На сьогодні усі провідні автомобільні фірми запропонували нові конструкції електромобілів і гібридів, причому деякі з них оголосили відмову найближчим часом від розвитку технологій, пов’язаних з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ).

В той же час в Україні кількість автомобілів з ДВЗ щорічно зростає як за рахунок імпорту нових, а ще більше за рахунок ввезення вживаних автомобілів. Це погіршує екологічну ситуацію в країні, збільшує потребу в імпортному нафтовому та газовому паливах.

Один із можливих шляхів вирішення цієї прблеми – державна підтримка вітчизняних розробок в області створення нових гібридних автомобілів або модернізації існуючих автомобілів за рахунок оснащення гібридним силовим приводом.

В роботі поставлена задача обгрунтування параметрів конструкції і режимів роботи елементів гібридної силової установки на базі вітчизняного автомобіля ЗАЗ-СЕНС.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Енергетична установка автомобіля працює в умовах змінних навантажувальних і швидкісних режимів роботи. При торганні з місця, прискоренні, гальмуванні відбувається різка зміна навантаження і частоти обертання колінчастого вала двигуна внутрішнього згоряння, що супроводжується значними механічними і тепловими навантаженнями на деталі, підвищеним вмістом шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

При торганні автомобіля з місця потрібний великий крутний момент на колісах для створення необхідного тягового зусилля. В той же час необхідний для руху автомобіля крутний момент двигуна внутрішнього згоряння забезпечується при достатньо великих частотах обертання колінчастого вала і взагалі відсутній при частоті обертання рівною нулю. Це по-перше вимагає наявності муфти зчеплення, а по-друге коробки передач, яка забезпечує збільшення передаточного відношення між колінчастим валом і колісами автомобіля.

Перехід від більшого передаточного відношення до меншого в процесі розгону автомобіля призводить до стрімкого зменшення частоти обертання колінчастого валу і вносить додаткові перехідні режими в роботу силової установки. Крім того, силова установка при русі автомобіля на малих передачах вимушена працювати при великих швидкостях обертання колінчастого валу, що призводить до інтенсивного зносу деталей циліндропоршневої групи.

Найкращі показники роботи ДВЗ забезпечуються на режимах, близьких до максимальних навантажень в середньому швидкісному діапазоні його роботи. Необхідність роботи двигуна при малих навантаженнях, малих і великих частотах обертання колінчастого валу призводить до погіршення паливної економічності, збільшення викиду шкідливих речовин, зменшення надійності роботи ДВЗ.

Наведені проблеми експлуатації традиційних енергетичних установок з ДВЗ обумовили пошук шляхів їх вирішення. Один із можливих способів –

використання гібридних силових установок, де традиційний ДВЗ комбінується з одним чи декількома електричними двигунами, що живляться від генератора або акумулятора. У складі такої установки ДВЗ працює на режимах, де його ефективність максимальна, що забезпечує її високі паливно-економічні та екологічні показники, а також високу надійність. На режимах, де двигун внутрішнього згоряння недостатньо ефективний, необхідну потужність і динамічні показники силової установки забезпечують електричні силові установки.

На сьогодні запропоновано ряд схем гібридних силових установок. Установки відрізняються послідовністю включення елементів в роботу (паралельна, послідовна, змішана), співвідношенням потужності ДВЗ і електричного двигуна, алгоритмами їх роботи, способом зарядки, потужністю і ємністю акумулятора тощо.

Останнім часом найбільше поширення отримали так звані «повні» і plug-in гібриди, що мають крім ДВЗ один чи декілька потужних електричних двигунів (порівняних за потужністю з ДВЗ), інвертор струму і акумулятор великої ємності. В plug-in гібридах акумулятор можна піззаряджати від стороннього джерела живлення електричним струмом. В умовах руху містом енергетична установка працює за рахунок електричних двигунів з акумулятором. ДВЗ підключається за необхідності забезпечення високої динамічності руху автомобіля, за умови руху з великою швидкістю або при розрядженому акумуляторі.

В технічній літературі наведено докладний опис конструкцій гібридних енергоустановок, їх показники і схеми. Проте майже відсутня інформація щодо методології їх створення, зокрема обґрунтування режимів роботи елементів таких енергоустановок, створення алгоритмів керування, побудови математичних моделей робочих процесів і динаміки руху її елементів на експлуатаційних режимах.

На сьогодні в Україні існує великий парк автомобілів з ДВЗ. Їх кількість щорічно зростає як за рахунок імпорту нових, а ще більше за рахунок ввезення

вживаних автомобілів. Це погіршує екологічну ситуацію в країні, збільшує потребу в імпортному нафтовому та газовому паливах.

В той же час європейські країни переходять на використання гібридних автомобілів і електромобілів. В декілької з них озвучені плани щодо повної відмови використання автомобілів з ДВЗ, припинення розвтку технологій двигунів внутрішнього згоряння.

Один із можливих шляхів вирішення цієї прблеми – модернізація існуючого автомобільного транспорту з оснащення гібрдним силовим приводом. Подібна модернізація передбачає демонтаж маховика, коробки передач, привода коліс автомобіля з встановленням одного чи декількох електричних двигунів, планетраного редуктора, інвертора, акумулятора, привода коліс, а також системи керування гібридним приводом.

Метою роботи є обгрунтування параметрів конструкції і режимів роботи елементів гібридної силової установки на базі вітчизняного автомобіля ЗАЗ-СЕНС.

Задачі дослідження:

1. Визначення потрібних параметрів силової установки автомобіля в умовах експлуатації

2. Розробка схеми гібридної силової установки, вибір параметрів її елементів

3. Обгрунтування режимів роботи елементів гібридної установки.

4. Дослідження параметрів гібридної силової установки при русі автомобіля з макисмльним прискоренням

2. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ЗА РЕЖИМАМИ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ЦИКЛУ NEDC

2.1. Методика дослідження

Визначення потрібних параметрів гібридної силової установки (максимальна і поточна потужність, частота обертання валу на виході з редуктора) залежить від її призначення. Якщо така установка встановлюється на легковий автомобіль, то її параметри визначаються умовами руху автомобіля.

В режими роботи автомобіля в умовах міста характеризуються великою часткою малих і середніх навантажень силової установки, перехідних режимів, зокрема режимів розгону і гальмування, режимів холостого ходу. Для моделювання режимів роботи автомобіля, визначення експлуатаційної паливної економічності і токсичності транспорту запропоновано їздові цикли.

В країнах Європи, зокрема Україні, при розробці стандартів визначення і нормування токсичності автомобільного транспорту прийнято європейський їздовий цикл NEDC.

Цикл NEDC встановлює залежність швидкості транспортного засобу від часу випробування і являє собою цикл тривалістю 1220 секунд, який складається з двох частин. Перша частина циклу - міський їздовий цикл UDC (Urban Driving Cycle) з максимальною швидкістю руху 50 км/год, що включає чотири послідовних їздових цикли і імітує умови руху автомобіля по місту. Друга частина циклу - швидкісний заміський цикл EUDC (ExtraUrban Driving Cycle) з максимальною швидкістю руху 120 км/год, що імітує умови руху автомобіля по магістралі. В процесі випробувань проводять вимірювання параметрів двигуна, які відносять до пройденого шляху (11 км).

В роботі прийнято паралельно-послідовну схему гібридної силової установки, яка включає двигун внутрішнього згоряння, тяговий електричний двигун і електричний двигун-генератор, що об’єднані планетарним редуктором-розподільником потужності. В такій схемі на першому етапі слід

визначити потужність на ведучій шестерні планетарного редуктора і частоту обертання шестерні.

За основу математичної моделі випробувального циклу взято методику, що запропоновано в ХНАДУ [1].

Передавальне число від ведучої шестерні планетарного редуктора до коліс u_0 в першому наближенні можна визначити за формулою:

$$U_0 = \frac{\pi \cdot n_{max} r_{st}}{30 V_{max}} = \frac{3{,}14 \cdot 6000 \cdot 0{,}285}{30 \cdot 41{,}66} = 4{,}3, \qquad (2.1)$$

де n_{max} – максимальна частота обертання ведучої шестерні планетарного редуктора, яка відповідає максимальній робочій частоті тягового електричного двигуна. В роботі прийнято n_{max} = 6000 хв$^{-1}$;

V_{max} – максимальна швидкість руху легкового автомобіля. В роботі прийнято V_{max} = 41,66 м/с, що відповідає швидкості 150 км/год;

r_{st} - статичний радіус коліс. Для дослідного автомобіля r_{st} = 0,285 м.

Цикл NEDC складається з чотирьох послідовних міських їздових циклів UDC і одного заміського їздового циклу EUDC. Схеми цих циклів представлені на рисунках 1.1 - 1.3.

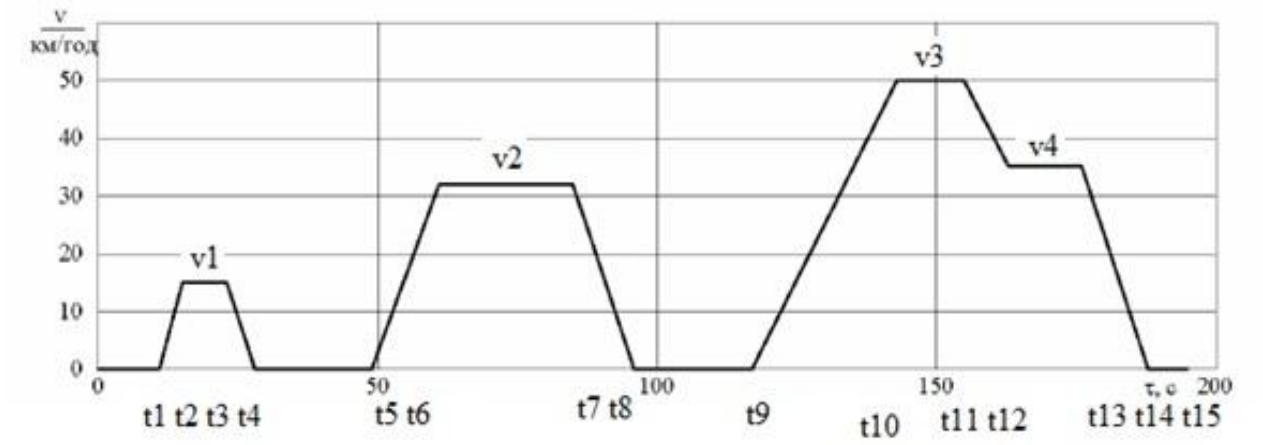

Рисунок 1.1 - Розрахункова схема міського їздового циклу UDC

Для розрахунку залежності швидкості від часу вводимо часові координати t_i, що характеризують моменти зміни параметрів режиму руху транспортного засобу (рис. 1.1, 1.2).

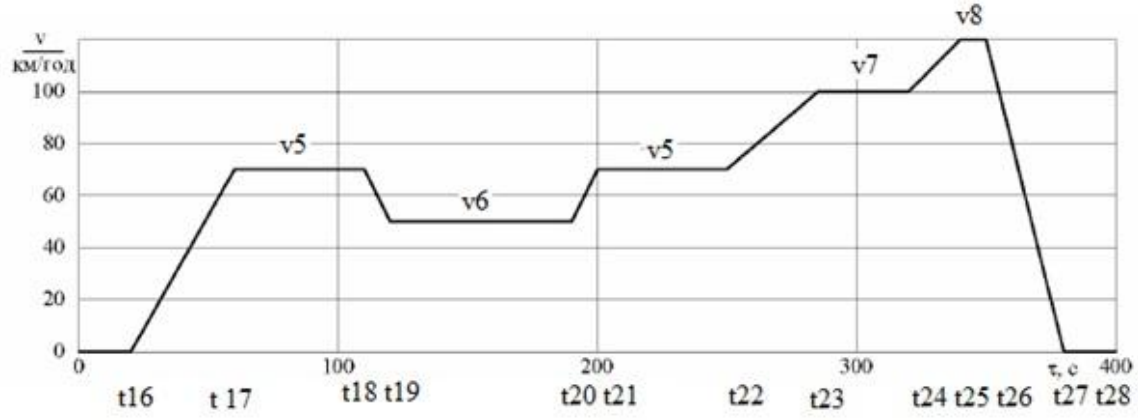

Рисунок 1.2 – Розрахункова схема позаміського їздового циклу EUDC

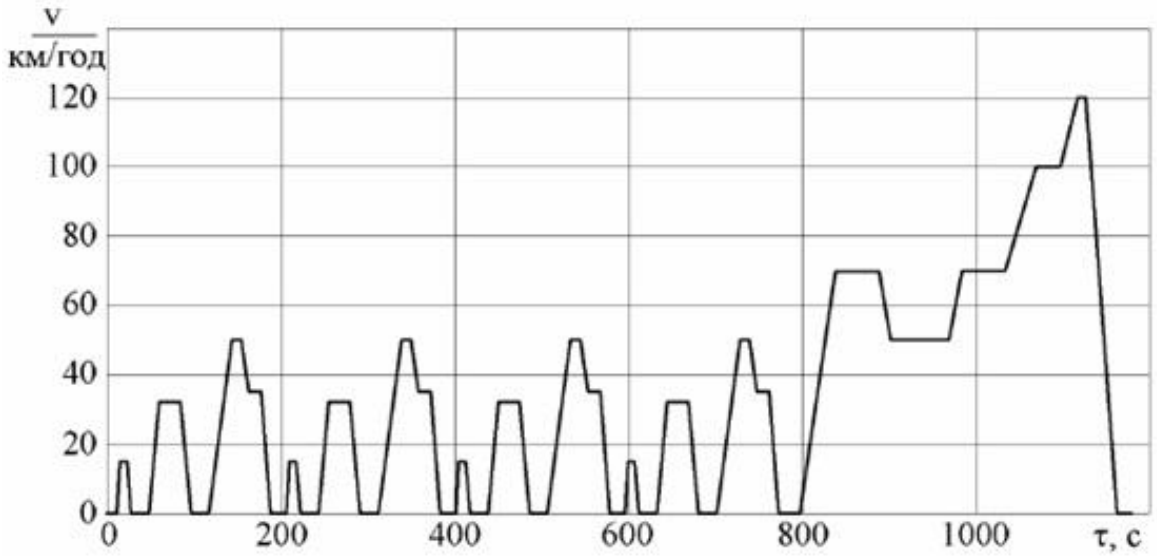

Рисунок 1.3 – Розрахункова схема комбінованого їздового циклу NEDC

Поточну часову координату позначаємо t_i, поточну швидкість - V_i.

При різних значеннях поточного часу t_i функція $v_i = f(t_i)$ змінюється за лінійними залежностями.

Для розрахунку їздового циклу він розбивається на ділянки тривалістю $\Delta t = 1$ с. Середня швидкість на ділянці розраховується як середєарифметичне значення між швидкостями на початку і в кінці ділянки:

$$V_{CPi} = \frac{V_i + V_{i+1}}{2}. \qquad (1.1)$$

Розрахунок окремого стаціонарного режиму їздового циклу виконується наступним чином.

Потрібна частота обертання зубчастого колеса на виході з планетарного редуктора (коронної шестерні або тягового електродвигуна В), хв$^{-1}$:

$$n_{bi} = \frac{V_{cpi} \cdot U_0}{0,377 \cdot r_{ст}} \quad (1.2)$$

Лобова площа автомобіля, м^2,

$$F = \alpha \cdot B_r \cdot H_r, \quad (1.3)$$

де α - коефіцієнт заповнення лобової площі автомобіля;

Br - висота автомобіля, м;

Hr - ширина автомобіля, м.

Потрібна потужність на ведучій шестерні планетарного редуктора (на короній шестерні або або тягового електродвигуна В), кВт,

$$N_{bi} = \frac{V_{cpi}}{3600 \cdot \eta_{тр}} \left[\frac{K \cdot F \cdot V_{cpi}^2}{12,96} + m_a \cdot 9,81 \cdot \psi_д + m_a \cdot j_i \cdot 1,1 \right]. \quad (1.4)$$

де m_a – маса автомобіля;

$\psi_д$ - коефіцієнт сумарного дорожнього опору. В роботі прийнято $\psi_д$ = 0,01;

$\eta_т$ - ККД трансмісії автомобіля. В роботі прийнято $\eta_т$ = 0,92;

К - коефіцієнт опору повітря. В роботі прийнято К = 0,25 (Н·с^2)/м^4;

j_i – прискорення автомобіля на елементарній ділянці, м/с^2,

$$a_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{3,6}. \quad (1.5)$$

Потрібний обертовий момент, Н·м:

$$M_{bi} = 9550 \cdot \frac{N_{bi}}{n_{bi}}. \quad (1.6)$$

2.2. Аналіз результатів дослідження

Результати розрахунку парамертів гібридної силової установки на режимах випробувального циклу NEDC наведені на рис. 1.4 – 1.7

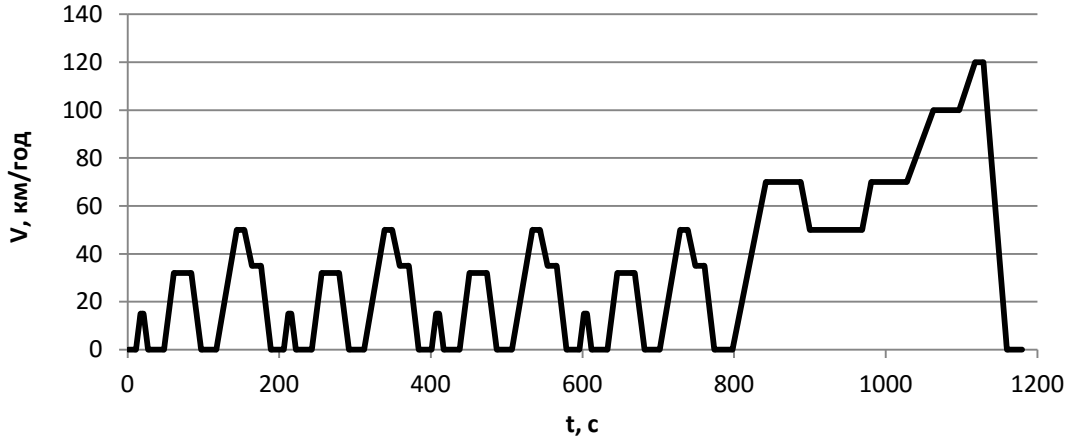

Рисунок 1.4 – Швидкість автомобіля на режимах випробувального циклу NEDC

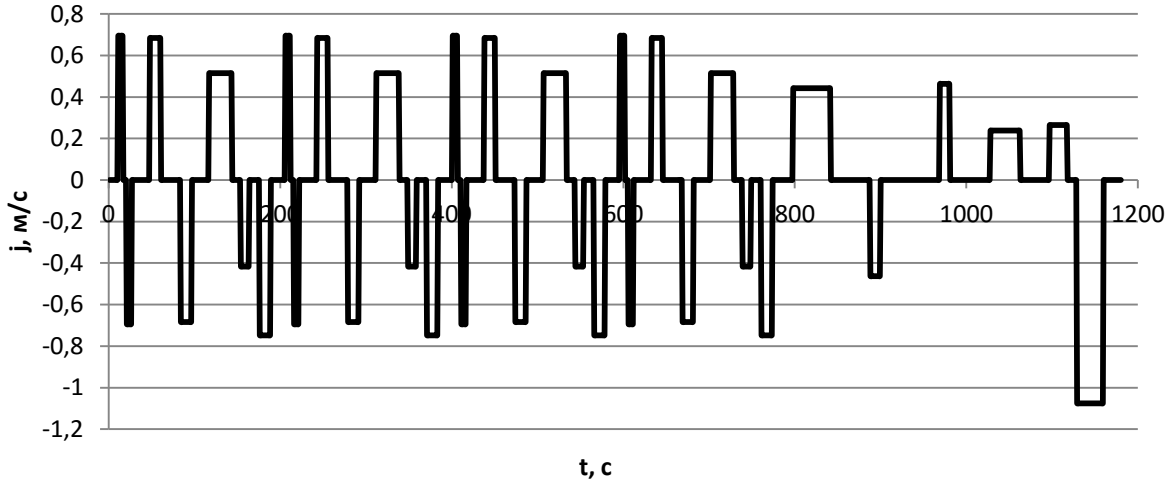

Рисунок 1.5 – Прискорення автомобіля на режимах випробувального циклу NEDC

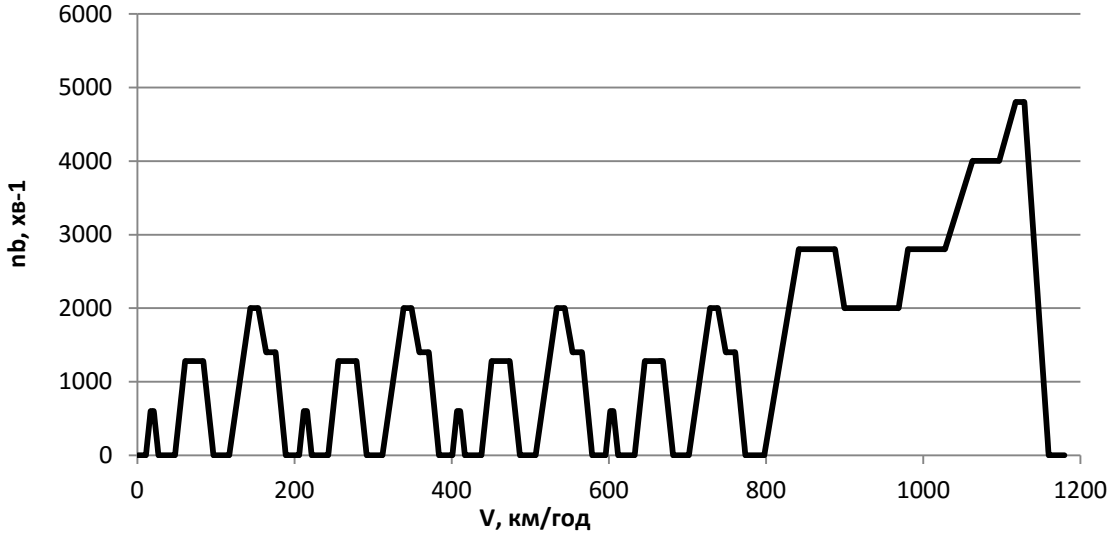

Рисунок 1.6 – Частота обертання ведучої шестрені планетарного редуктора на режимах випробувального циклу NEDC

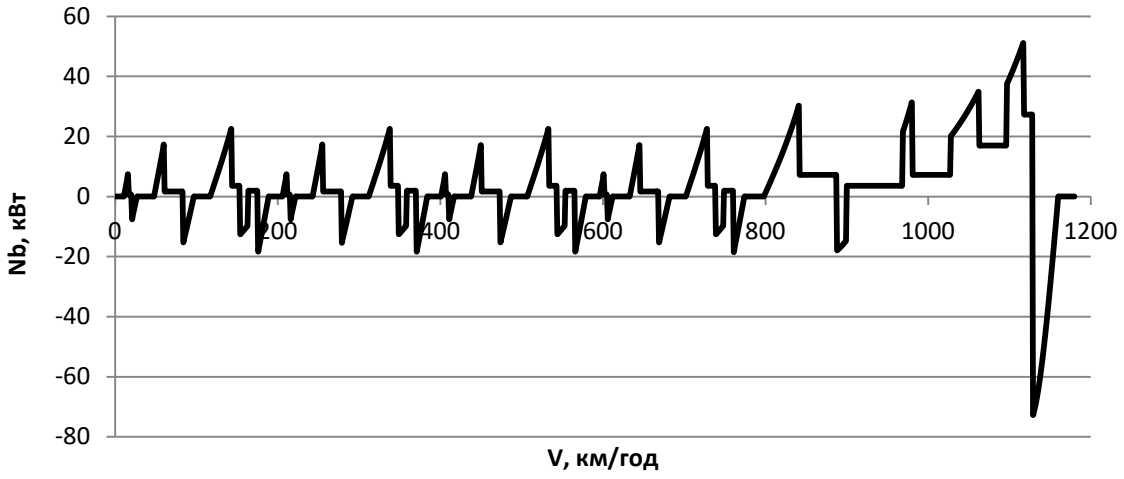

Рисунок 1.7 – Потужність на ведучій шестрені планетарного редуктора на режимах випробувального циклу NEDC

Аналіз даних рисунків 1.6, 1.7 показує, що на режимах міського випробувального циклу UDC частота обертання ведучої шестерні гібридної силової установки не перевищує 2000 хв$^{-1}$, а потужність на цій шестерні – 23 кВт.

На режимах позаміського випробувального циклу EUDC частота обертання ведучої шестерні гібридної силової установки не перевищує 4800 хв$^{-1}$, а потужність на цій шестерні – 51 кВт.

З рисунку 1.7 видно, що на гальмування транспортного засобу витрачається достатньо велика потужність, яка в автомобілях з ДВЗ перетворюється переважно в теплоту тертя і розсіюється в атмосферу. Проте в гібридній силовій установці можлива часткова рекуперація цієї потужності гальмування з виробництвом електричної енергії. В цьому випадку максимальна потужність генерації струму енергетичною установкою складатиме 70 кВт без урахування втрат в енергетичній установці. При застосуванні повної регенерації електричної енергії в процесі гальмування середня потужність силової установки в усьому діапазоні режимів роботи за циклом NEDC складає 3 кВт.

Таким чином, сформульовано основні вимоги до гібридної силової установки:

- Максимальна потужність на ведучій шестерні силової установки при русі за міським циклом повинна бути більшою за 23 кВт при частоті обертання 2000 хв$^{-1}$;
- Максимальна потужність на ведучій шестерні силової установки при русі за позаміським циклом повинна бути більшою за 50 кВт при частоті обертання 4800 хв$^{-1}$;
- Максимальна потужність генерації струму повинна бути більше за 70 кВт.

3. РОЗРОБКА СХЕМИ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ І АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ЇЇ РОБОТИ

3.1 Розробка схеми гібридної силової установки

За результатами проведеного аналізу видно, що для реалізації руху автомобіля за міським циклом UDC виключно за рахунок електричної тяги, на автомобіль слід встановити тяговий електричний двигун, максимальною потужністю більше за 23 кВт і максимальною частотою обертання 6000 хв$^{-1}$.

Максимальну потужність тягового електричного двигуна обираємо виходячи з наступних міркувань.

По-перше потужність тягового електричного двигуна повинна забезпечувати задовільну прийомистість автомобіля при руханні з місця і розгоні до швидкості 100 км/год

По-друге для забезпечення надійної роботи і високого ККД електричного двигуна режими його роботи не повинні виходити за 50-60% від максимальної потужності. Робота при максимальній потужності дозволяється лише протягом невеликого проміжку часу.

Таким чином, на дослідний автомобіль запропоновано встановити тяговий електричний двигун/генератор потужністю 50 кВт і робочим діапазоном частоти обертання від 0 до 6000 об/хв. В цьому випадку тяговий електричний двигун можна безпосередньо приєднати до ведучої шестерні планетарного механізму.

Двигун внутрішнього згоряння включається в роботу в наступних випадках:

- за необхідності забезпечення необхідного рівня зарядки акумулятора, як правило 0,6 максимального рівня і вище;
- в умовах руху з потужністю більше 30 кВт, наприклад при реалізації позаміського циклу EUDC;
-в умовах руху зі швидкістю більше 50 км/год

- при русі з максимально можливим для даного автомобіля прискоренням. В цьому випадку ДВЗ працює на режимах близьких до зовнішньої швидкісної характеристики.

При дослідженні за основу прийнято конструкцію і параметри гібридного привода автомобіля Toyota Prius II [2-4]. На базовому автомобілі запропоновано залишити серійний двигун МЕМЗ-307, на місці маховика встановити електричний двигун/генератор струму ЕД1; замість коробки передач встановити планетарний редуктор з тяговим електричним двигуном ЕД2. Схема приводу наведена на рис.3.1.

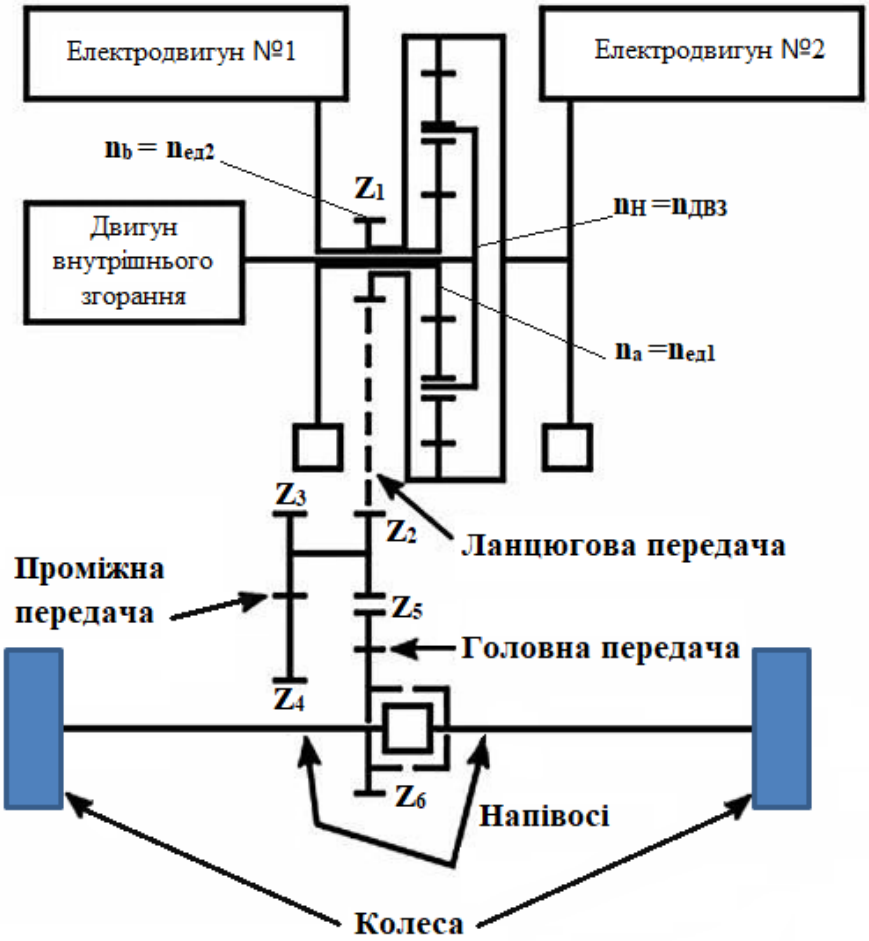

Рисунок 3.1 – Схема гібридного приводу

В якості ведучої шестерні планетарного редуктора застосовано коронну шестерню. Ця шестерня через ланцюгову передачу і проміжну шестерню приєднана до головної передачі трансмісії. З коронною шестернею з’єднаний

вал тягового електричного двигуна/генератора ЕД2 потужністю 50 кВт і максимальною частотою обертання 6000 хв-1.

В якості двигуна внутрішнього згоряння прийнято двигун МЕМЗ-307 номінальною потужністю 50 кВт при частоті обертання колінчастого валу 5400 об/хв, який застосовано на базовому автомобілі ЗАЗ-СЕНС. Це дозволить забезпечити максимальну уніфікацію з серійною силовою установкою. Замість маховика і коробки передач застосовано планетарний редуктор. Двигун через муфту зчеплення приєднаний до водила планетарного редуктора.

Електричний двигун/генератор ЕД1 приєднаний до сонячної шестерні планетарного редуктора. Наявність двигуна/генератора струму ЕД1 обумовлена необхідністю зарядки акумулятора під час руху автомобіля на режимах розгону або руху з постійною швидкістю. В цьому випадку колеса обертаються від тягового електричного двигуна/генератора ЕД2, а ДВЗ приводить в рух вал електричного двигуна/генератора ЕД1. Частина потужності ДВЗ надходить на ведучі колеса. Також двигун/генератор ЕД1 виконує функцію стартера для запуска ДВЗ.

Вал двигуна ЕД1 можна загальмувати з використанням стрічкового гальма. Максимальна частота обертання і потужність двигуна/генератора ЕД1 обумовлені вибраними режимами роботи тягового двигуна/генератора ЕД2 і двигуна внутрішнього згоряння.

Параметри гібридного привода наведені в таблиці 3.1

При виконанні розрахунків вважаємо, що маса автомобіля збільшилася на вагу акумуляторної батареї. Збільшення маси автомобіля внаслідок наявності двох електродвигунів і планетарного редуктора не враховуємо, оскільки це збільшення компенсується зменшенням маси автомобіля внаслідок відсутності механічної коробки передач і маховика.

Таблиця 3.1 - Параметри гібридного привода

Параметр	Значення параметру
Двигун внутрішнього згоряння:	
Робочий об'єм двигуна, zVh, л	1,3
Діаметр циліндра D, м	0,075
Хід поршня S, м	0,0735
Ступінь стиску ε	9,8
Номінальна эфективна потужність ДВЗ Nен, кВт	50
Номінальна частота обертання колінчастого вала $n_н$, мин$^{-1}$	5400
Електричні двигуни/генератори:	
Максимальна потужність тягового електродвигуна ЕД2 $N_{ЕД1max}$, кВт	50
Максимальна частота обертання тягового електродвигуна ЕД2 $n_{ЕД2max}$, хв$^{-1}$	6000
Максимальний крутний момент тягового електродвигуна ЕД2, Н·м	400
Максимальна потужність генератора ЕД1 $N_{ЕД1max}$, кВт	13
Максимальна частота обертання генератора ЕД1 $n_{ЕД1max}$, хв$^{-1}$	10000
Акумуляторна батарея:	
Потужність акумуляторної батареї, кВт·год	21
Напруга на клемах акумуляторної батареї, В	201,6
Маса акумуляторної батареї m, кг	80
Редуктор:	
Конструктивний параметр планетарного ряда редуктора $К_{ред}$	2,6
Передавальне число передачі від коронної шестерні колесам U_0	4,113
Число зубів шестерен:	
Коронна Zb	78
Сонячна Za	30
Ведуча шестерня ланцюгової передачі Z_1	36
Ведома шестерня ланцюгової передачі Z_2	35
Ведуча шестерня проміжної передачі Z_3	30
Ведома шестерня проміжної передачі Z_4	44
Ведуча шестерня головної передачі Z_5	26
Ведома шестерня головної передачі Z_6	75

3.2. Визначення параметрів ДВЗ і тягового електричного двигуна/генератора при роботі з максимальним навантаженням

У складі гібридної силової установки ДВЗ працює на режимах зовнішньої швидкісної характеристики, оскільки скаме на цих режимах досягається найкраща питома паливна економічність. Ефективну потужність ДВЗ можна визначити за емпіричним рівнянням [5]:

$$N_e = N_{ен} \cdot \left[A_1 \cdot \frac{n}{n_н} + A_2 \cdot \left(\frac{n}{n_н}\right)^2 - \left(\frac{n}{n_н}\right)^3 \right]; \qquad (3.1)$$

де $N_{ен}$ – номінальна потужність двигуна;

A_1, A_2 - емпіричні коефіцієнти. Для двигуна МЕМЗ-307 можна прийняти $A_1=A_2=1$;

n, $n_н$ – поточна і номінальна частоти обертання колінчастого валу двигуна.

Поточне значення крутного моменту на режимах зовнішньої швидкісної характеристики

$$M_{кр} = 9,554 \cdot \frac{N_e}{n}. \quad (3.2)$$

Результати розрахунку зовнішньої швидкісної характеристики двигуна МЕМЗ-307 наведені на рисунку 3.2.

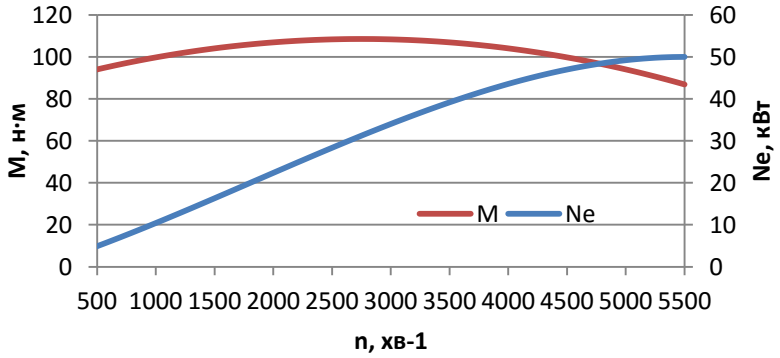

Рисунок 3.2 – Зовнішня швидкісна характеристика двигуна МЕМЗ-307

При моделюванні привода взято характеристику максимального крутного моменту $Мкр_{ЕД2}$ синхронного електричного двигуна автомобіля Toyota Prius II [6] (рис.3.3).

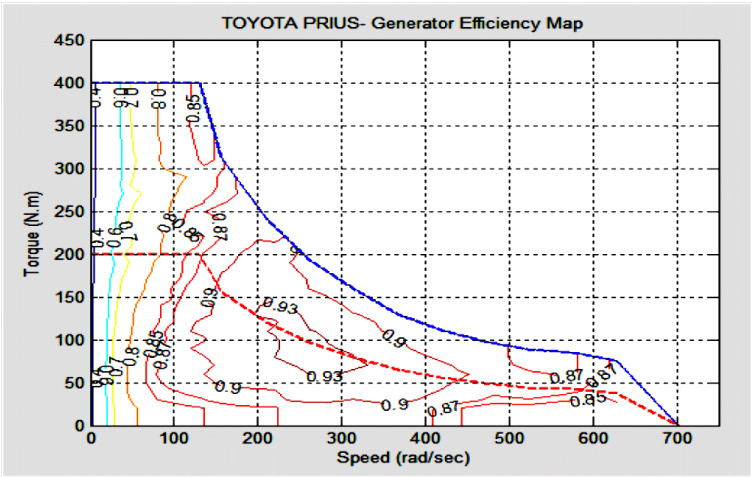

Рисунок 3.3 - Характеристика крутного моменту і ККД тягового електричного двигуна Toyota Prius II [6]

За відомими значеннями $M_{ЕД2}$ визначено потужність двигуна (рис. 3.4) за формулою:

$$N_{ЕД2} = \frac{\pi \cdot M_{ЕД2} \cdot n}{30} \tag{3.3}$$

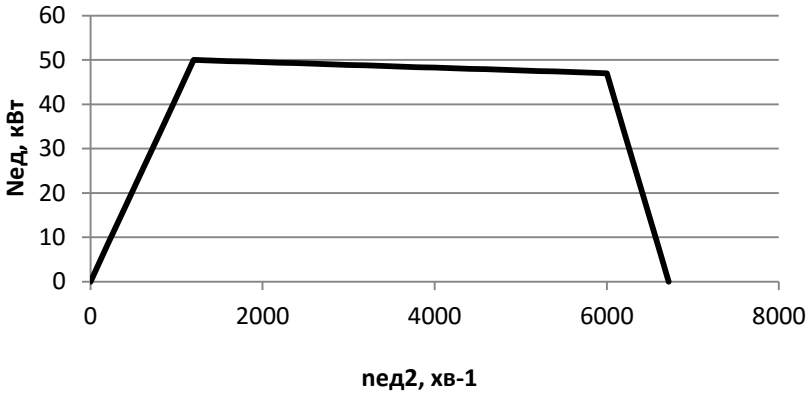

Рисунок 3.4 - Характеристика потужності тягового електричного двигуна Toyota Prius II

З рисунка 3.4 видно, що характеристику потужності електричного двигуна $N_{ЭД_2}$ можна описати лінійними рівняннями залежно від наступних параметрів:

- максимальної робочої частоти обертання n_{p_max};
- максимальної частоти обертання n_{max};
- частоти обертання, за якої встановлюється максимальна потужність двигуна n_{Nmax};
- максимальної потужності N_{max};
- потужності двигуна при максимальній робочій частоті обертання N_{np_max}.

Наприклад, можна використати такі рівняння:

В діапазоні частоти обертання від 0 до n_{Nmax} = 1250 хв$^{-1}$:

$$N_{ЕД2} = \frac{N_{ЕД2\,max}}{n_{N\,max}} n_{ЕД2} \tag{3.4}$$

В діапазоні частоти обертання від n_{Nmax} = 1250 хв$^{-1}$ до n_{p_max} = 6000 хв$^{-1}$:

$$N_{ЕД2} = \frac{(n_{N\,max} - n)}{n_{p\,max}} \cdot 0{,}06 \cdot N_{ЕД2\,max} + 0{,}94 \cdot N_{ЕД2\,max} \tag{3.5}$$

В діапазоні частоти обертання від n_{p_max} = 6000 хв$^{-1}$ до n_{max} = 6690 хв$^{-1}$:

$$N_{ЕД2} = \frac{(1{,}12 \cdot n_{p\,max} - n)}{0{,}12 \cdot n_{p\,max}} \cdot 0{,}94 \cdot N_{ЕД2\,max} \qquad (3.6)$$

3.3. Режими роботи елементів гібридної силової установки

3.3.1. Рух в режимі електромобіля

Швидкісні режими роботи елементів силової уставновки взаємоповязані і визначаються співвідношеннями для планетарного редуктора.

Швидкість руху автомобіля визначається частотою обертання коронної шестерні, з якою повязаний вал тягового електричного двигуна/генератора ЕД2. Відповідно частота обертання вала двигуна ЕД2

$$n_{ЕД2} = \frac{V \cdot U_0}{0{,}377 \cdot r_{st}}, \qquad (3.7)$$

де U_0 – передавальне число передачі від коронної шестерні колесам

$$U_0 = \frac{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6}{Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5} = \frac{35 \cdot 44 \cdot 75}{36 \cdot 30 \cdot 26} = 4{,}113 \qquad (3.8)$$

де Z_1,– Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6 - числа зубів шестерен приводу.

Режими роботи елементів гібридної енергоустановки за схемою рис. 3.1 і відповідно потоки енергії між її ними визначаються прийнятим алгоритмом роботи енергоустановки. В роботі прийнято, що при русі в міському циклі UDC автомобіль рухається за рахунок тягового електричного двигуна і акумулятора. При необхідности руху з більшим прискоренням та/або швидкістю рух автомобіля забезпечується тяговим електричним двигуном і двигуном внутрішнього згоряння.

При русі в міському циклі UDC ДВЗ не працює, відповідно частота обертання водила редуктора $n_{ДВЗ}$ = 0 хв$^{-1}$.

Частота обертання сонячної шестерні і відповідно вала електричного двигуна/генератора ЕД1 визначається за рівнянням планетарного ряда [7]:

$$n_{ЕД1} = n_{ДВЗ}(k+1) - k \cdot n_{ЕД2}, \qquad (3.9)$$

де k – конструктивний параметр планетарного ряда. Цей параметр представляє собою відношення числа зубів коронної шестерні Z_b до числа зубів сонячної шестерні Z_a. При обраних параметрах редуктора:

$$k = \frac{Z_b}{Z_a} = \frac{78}{30} = 2,6. \qquad (3.10)$$

Крутний момент на валу тягового електричного двигуна/генератора ЕД2 визначається моментом опору оберанню коліс автомобіля, у загальному випадку умовами руху автомобіля.

При русі в міському циклі UDC на обмотку статора електричного двигуна/генератора ЕД1 струм не подається, його ротор обертається вільно.

Швидкості обертання елементів гібридної уставновки повязані між собою як сторони одного або двох трикутників. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів гібридної установки при русі автомобіля зі швидкістю 50 км/год показаний на схемі рис. 3.5.

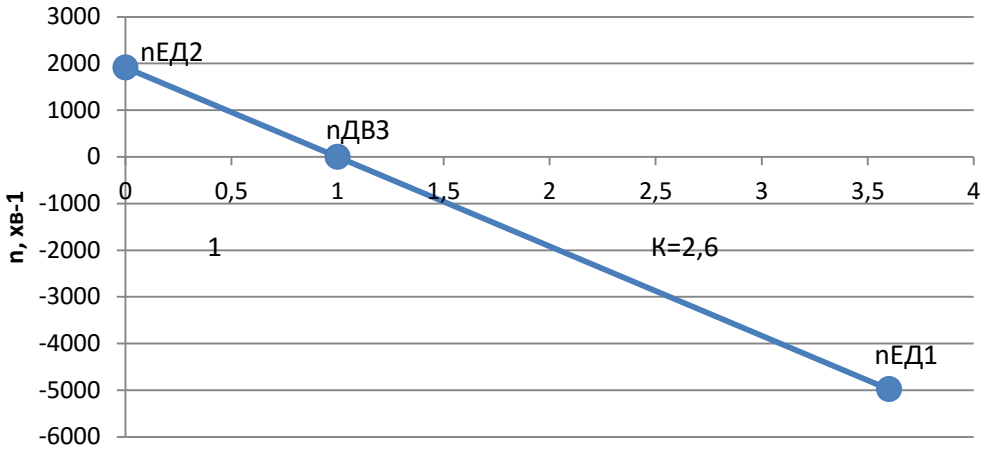

Рисунок 3.5. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки русі автомобіля за міським циклом. Швидкість автомобіля 50 км/год.

3.3.2. Рух з високим навантаженням або при розрядженому аукумуляторі

При русі автомобіля з потужністю на коронній шестрені редуктора більше 30 кВт та/або ступені розрядки акумулятора більше за 0,6 максимального заряду запускається двигун внутрішнього згоряння. Швидкісні

режими роботи ДВЗ і електричного двигуна/генератора струму ЕД1 визначаються залежно від швидкості руху автомобіля і відповідно частоти обертання тягового електричного двигуна/генератора ЕД2. Аналогічний підхід запропоновано в роботі [8].

Запуск ДВЗ

Для запуска ДВЗ на обмотку статора електричного двигуна/генератора ЕД1 подається струм. Взаємодія електричних полів ротора і статора створює гальмівний момент на валу цього двигуна, його частота обертання починає зменшуватися, а колінчастий вал двигуна внутрішнього згоряння починає обертатися. Таким чином, електричний двигун ЕД1 працює в режимі стартера.

Після запуску ДВЗ, він починає виробляти потужність, більша частина якої йде на привід коліс автомобіля, а менша – на привід вала генератора струму.

Рух автомобіля зі швидкістю від 0 до 55 км/год

Робоча частота обертання колінчатого валу ДВЗ визначається швидкістю руху автомобіля. При швидкості руху автомобіля в діапазоні від 0 до 55 км/год частота колінчастого валу ДВЗ призначається рівною 1500 хв$^{-1}$ Така частота дозволяє зменшити механічні втрати в ДВЗ. В цьому випадку частоту вала тягового двигуна/генератора ЕД2 можна визначити за рівнянням (3.7), а частоту вала електричного двигуна/генератора ЕД1 – за рівнянням (3.9). Взаємозвязок швидкостей обертання елементів гібридної енергоустановки при русі автомобіля зі швидкістю 30 км/год наведений на рис. 3.6.

Після досягнення мінімальної робочої частоти обертання ДВЗ переводиться на роботу з максимальним навантаженням і працює на режимах зовнішньої швидкісної характеристики, де його ефективність максимальна. Оночасно навантаження на тяговий двигун/генератор ЕД2 зменшується таким чином, щоб сумарний крутний момент на коронній шестерні залишався немінним.

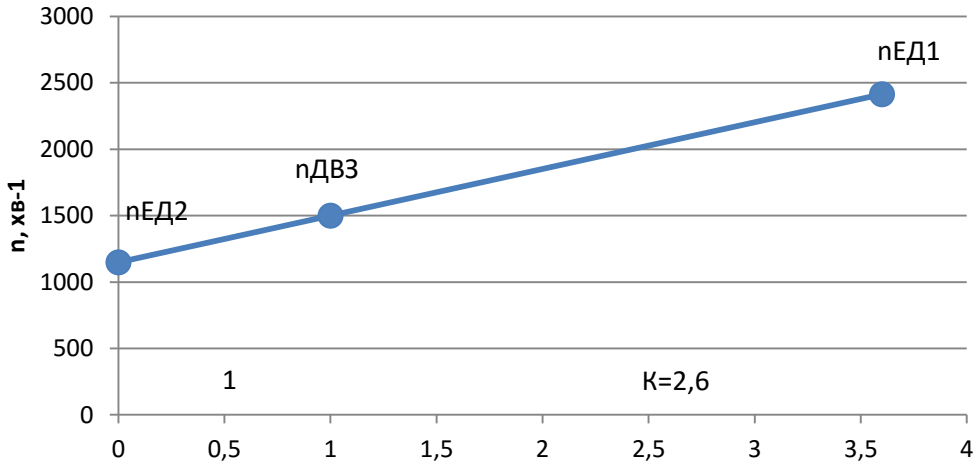

Рисунок 3.6. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки русі автомобіля з великим навантаженням. Швидкість автомобіля 30 км/год.

Сумарний крутний момент на коронній шестерні від тягового електричного двигуна і двигуна внутрішнього згоряння

$$M_{\Sigma} = M_{ЕД2} + M_{ДВЗ}\frac{k}{k+1}. \qquad (3.11)$$

Крутний момент, що передається від двигуна внутрішнього згоряння до генератора струму

$$M_{ЕД1} = -M_{ДВЗ}\frac{1}{k+1} \qquad (3.12)$$

При k = 2,6 від двигуна внутрішнього згоряння до коронної шестерні передається 72% крутного моменту, а до генератора – 28%.

Загальна потужність на коронній шестерні

$$N_{\Sigma} = \frac{\pi \cdot M_{\Sigma} \cdot n_{ЕД2}}{30} \qquad (3.13)$$

Ця потужність визначає тягове зусилля на колесах при русі з великим навантаженням.

Потужність, що витрачається на привід генератора струму

$$N_{\Sigma} = \frac{\pi \cdot M_{ЕД1} \cdot n_{ЕД1}}{30} \qquad (3.14)$$

Рух автомобіля зі швидкістю від 50 до 110 км/год

При швидкості руху автомобіля в діапазоні від 50 до 110 км/год частота обертання вала електричного двигуна/генератора ЕД2 визначається швидкістю автомобіля, тобто залежністю (3.7).

Гальмівний крутний момент на валу електричного двигуна/генератора ЕД1 збільшується доки частота обертання його ротора не зменшиться до нуля. Після цього вал двигуна ЕД1 фіксується стрічковим гальмом. В цьому випадку частоту обертання колінчастого вала ДВЗ можно визначити за рівнянням:

$$n_{ДВЗ} = \frac{k}{k+1} \cdot n_{ЕД2}. \qquad (3.15)$$

Взаємозвязок швидкостей обертання ементів силової установки при русі автомобіля зі швидкістю 80 км/год наведений на рис. 3.7.

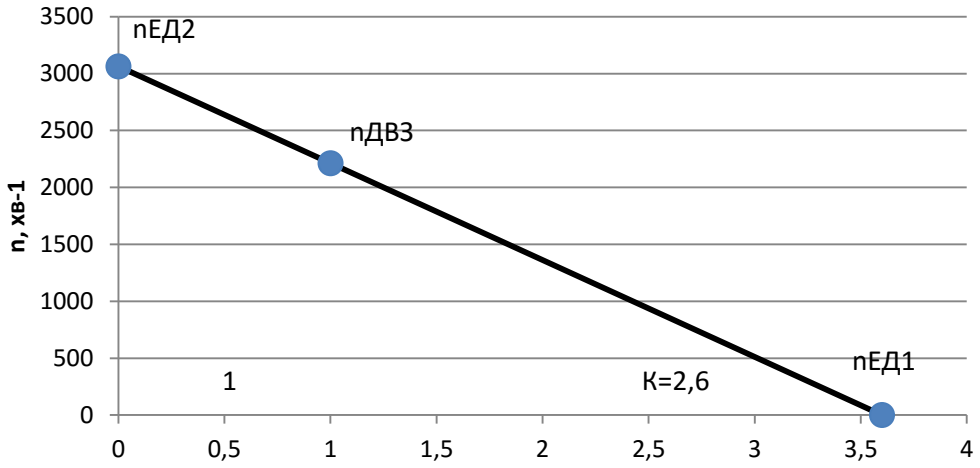

Рисунок 3.7. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки русі автомобіля з великим навантаженням. Швидкість автомобіля 80 км/год.

Крутний момент і потужність елементів силової установки визначаються за залежностями (3.11)-(3.14).

Рух автомобіля зі швидкістю від 110 до 150 км/год

При досягненні автомобілем швидкості 110 км/год і фіксованому валі електричного двигуна/генератора ЕД1 частота обретання вала електричного двигуна/генератора ЕД2 стає рівною 4210 хв$^{-1}$, а колінчастого вала ДВЗ – 3040 хв$^{-1}$,.

Подальше зростання частоти обертання колінчастого валу ДВЗ призводить до збільшення механічних втрат і питомої витрати палива. Тому при русі автомобіля зі швидкістю більше 110 км/год частота обретання колінчастого вала ДВЗ фіксується на рівні 3000 хв$^{-1}$, а його потужність змінюється за зовнішньою швидкісною характеристикою.

Вал електричного двигуна/генератора ЕД1 звільняється і на обмотку статора подається струм. Електричний двигун/генератор починає працювати в режимі генератора. При зростанні крутного моменту двигуна збільшується крутний момент на валу генератора і одночасно крутний момент, що передається від ДВЗ на коронну шестерню і колеса відповідно.

Крутний момент і потужність елементів силовової установки визначаються за залежностями (3.11)-(3.14).

Взаємозвязок швидкостей обертання ементів силової установки при русі автомобіля зі швидкістю 130 км/год наведений на рис. 3.8.

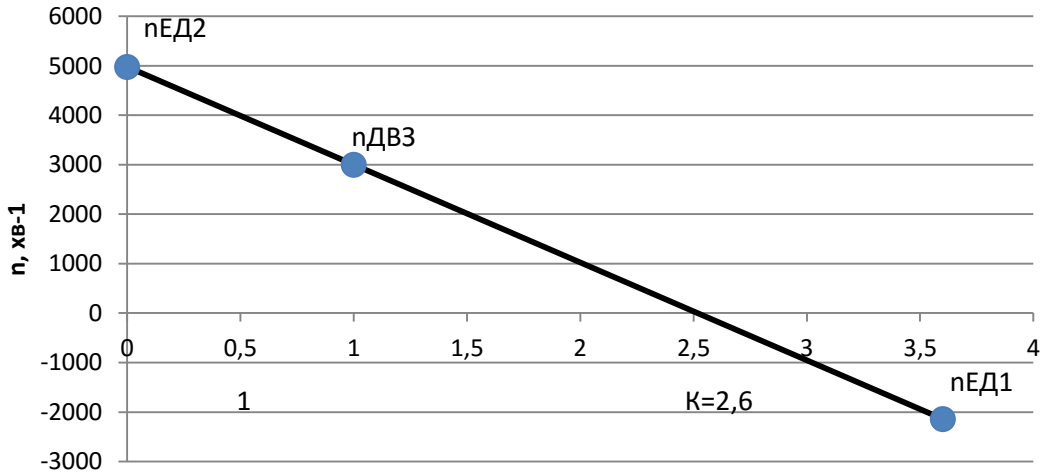

Рисунок 3.8. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки русі автомобіля з великим навантаженням. Швидкість автомобіля 130 км/год.

3.3.3. Гальмування

Гальмування в гібридному автомобілі починається вже при відпусканні акселератора. Якщо рух здійснюється в режимі електромобіля, то ДВЗ деактивований, а двигун/генератора ЕД1 знеструмлений. Тяговий електричний

двигун/генератор ЕД2 працює в режимі генератора, створюючи крутний момент опору прокручуванню вала.

Якщо були задіяні ДВЗ і двигун/генератор ЕД1, то дросельна заслінка ДВЗ прикривається, а подача палива і запалювання припиняються. Електричні двигуни /генератори ЕД1 і ЕД2 працюють в режимі генераторів, виробляючи електричну енергію для живлення акумуляторної батареї.

При натисненні на педаль гальма додатково активується система гальмування з колодками.

3.3.4. Задній хід

При русі заднім ходом залежно від ступеня розрядки акумулятора можлива реалізація двох варіантів роботи енергоустановки.

При зарядженому акумуляторі рух заднім ходом здійснюється за рахунок електричного двигуна/генератора ЕД2, який працює від акумулятора. Вал цього двигуна обертається в протилежному напрямі. При цьому ДВЗ деактивований, а двигун/генератор ЕД1 знеструмлений. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки показаний на рис. 3.9.

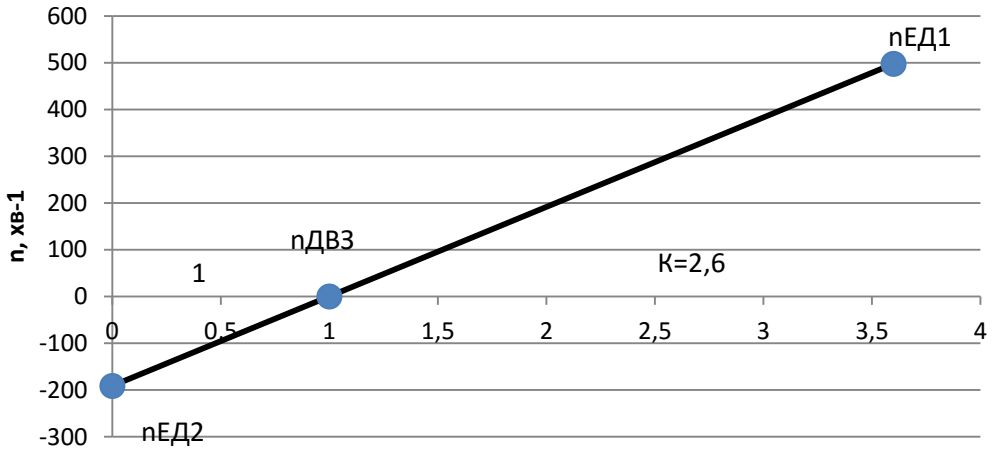

Рисунок 3.9. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки русі автомобіля заднім ходом і зарядженому акумуляторі. Швидкість руху автомобіля 5 км/год

При розрядженому акумуляторі двигун/генератор ЕД1 запускає ДВЗ, тобто працює як стартер. Після запуску ДВЗ і вихода на режим мінімальної робочої частоти обертання двигун/генератор ЕД1 починає працювати як генератор, виробляючи струм для живлення тягового двигуна/генератора ЕД2. Колеса приводяться в рух ДВЗ і тяговим двигуном/генератором ЕД2.

Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки русі автомобіля заднім ходом і розрядженому акумуляторі. Наведений на рис.3.10.

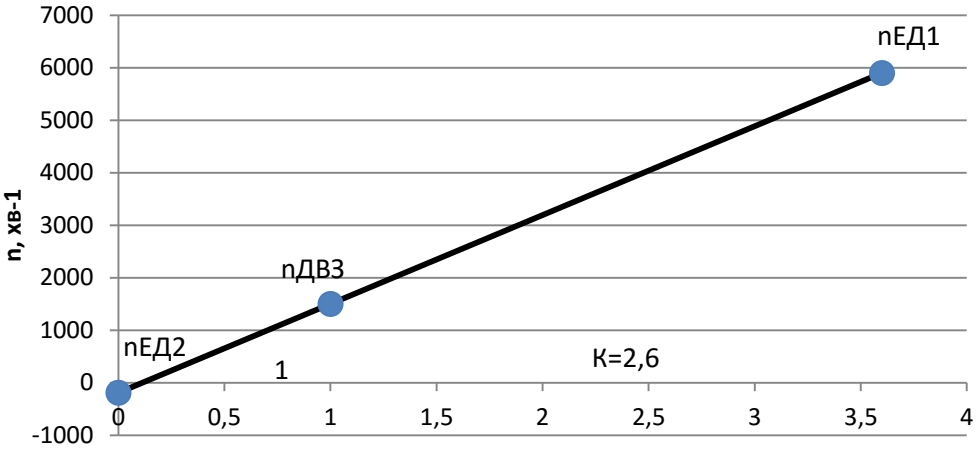

Рисунок 3.10. Взаємозвязок швидкостей обертання елементів енергетичної установки при русі автомобіля заднім ходом і зарядженому акумуляторі.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано методику розрахунку швидкості і прискорення автомобіля, частоти обертання ведучаої шестерні і потужності на ведучій шестрені легкового автомобіля на режимах європейського випробувального цикла NEDC.

2. В результаті розрахунку показано, що на режимах міського випробувального циклу UDC частота обертання ведучої шестерні гібридної силової установки не перевищує 2000 хв$^{-1}$, а потужність на цій шестерні – 23 кВт. На режимах позаміського випробувального циклу EUDC частота обертання ведучої шестерні гібридної силової установки не перевищує 4800 хв$^{-1}$, а потужність на цій шестерні – 51 кВт.

3. На гальмування транспортного засобу витрачається достатньо велика потужність (до 70 кВт) при гальмуванні на режимі позаміського циклу EUDC. При застосуванні повної регенерації електричної енергії в процесі гальмування середня потужність силової установки в усьому діапазоні режимів роботи за циклом NEDC складає 3 кВт.

4. Розроблено схему гібридної силової установки, обгрунтовано конструктивні параметри її елементів. Запропоновано емпіричні залежності максимальної потужності тягового електричного двигуна/генератора від частоти обретання.

5. Обгрунтувано режими роботи електричних двигунів/генераторів, а також ДВЗ у складі гібридної установки, запропоновано методику оцінки їх потужності і частоти обретання валів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьменко А. П. Улучшение показателей малолитражного газового двигателя с искровым зажиганием за счет выбора параметров, которые определяют процесс сгорания: дис. канд. техн. наук: 05.05.03 / Кузьменко Анатолий Петрович. - Х. – 2012. – 197 с.

2. HSU J. S., AYERS C. W., COOMER C. L. Report on Toyota/Prius Motor Design And Manufacturing Assessment/ Oak Ridge National Laboratory, 2004. – 14 p.

3. Hsu J. S., Ayers C. W., Coomer C. L., Wiles R. H., Campbell S. L., Lowe K. T., Michelhaugh R. T. Report on Touyota/Prius Moptor Torque Capability, Torque Property, No-load Back EMF, And Mechanical Losses/ Oak Ridge National Laboratory, 2004. – 14 p.

4. Ayers C. W., Hsu J. S., Marlino L. D., Miller C. W, Ott G. W., Jr., Oland C. B. Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System Interim Report, 2004 – 35 p.

5. Колчин А.И. Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. Школа, 1980. – 400 с.

6. Bashar Alzuwayer, Mahmoud Abdelhamid, Pierluigi Pisu, Pietro Giovenco, and Paul Venhovens. Modeling and Simulation of a Series Hybrid CNG Vehicle / SAE Int. J. Alt. Power. / Volume 3, Issue 1 (May 2014). P.20-29. doi:10.4271/2014-01-1802.

7. Анохина, М.В. Методические рекомендации по выполнению курсового проекта «Привод к стенду с использованием планетарного редуктора» / М.В. Анохина, С.В. Никитин. – М.: МАДИ, 2017. – 60 с.

8. M. Ehsani, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design , CRC Press, 2005.

9. Стуканов В.А. Основи теории автомобильных двигателей и автомобиля. Учебное пособие. – М:ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 368 с.