

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СИНХРОНІЗАЦІЇ У ДВОСТУПЕНЕВІЙ ПЛАНЕТАРНІЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІЙ ТРАНСМІСІЇ

Михалевич М.Г., Єременко А.В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** При перемиканні швидкостей в несинхронізованих коробках передач відбувається зниження динамічних якостей транспортного засобу. Метою роботи є формування залежностей, що визначають параметри роботи системи керування в умовах інтенсивного розгону транспортного засобу. Шляхом моделювання роботи електродвигуна, двоступеневої планетарної коробки передач та руху транспортного засобу при перериванні потоків потужності отримано оптимальні коефіцієнти ПІД-регулятора.*

***Ключові слова:** час синхронізації, електродвигун, коробка передач.*

Вступ

Подальша модернізація існуючих транспортних засобів спеціального призначення неможлива без розробки і впровадження електричних платформ на їх базі. Це тягне за собою кардинального переосмислення конструктивних рішень та принципів роботи. Існуюча концепція транспортного засобу з електромеханічною трансмісією із повною масою 25 т не дозволяє одночасно виконати вимоги із забезпечення максимальної швидкості руху 100 км/год. та подолання кутів ухилу не менше 30° при фіксованому передавальному відношенні трансмісії. Існують два варіанти вирішення даної проблеми – встановлення тягових електродвигунів більшої потужності або додаткової коробки передач з двома діапазонами передавальних відношень для виконання всіх вимог до транспортного засобу. Перший варіант вирішення проблеми тягне за собою загальне збільшення маси і габаритів тягового електрообладнання, що не дозволяє його встановити в існуючі транспортні засоби без перекомпонування і, як наслідок, суттєвого здорожчання транспортного засобу. Другий шлях

вирішення проблеми забезпечує динамічне прискорення та рух в складних дорожніх умовах в межах першого діапазону, та забезпечення максимальної швидкості в межах другого діапазону.

Аналіз публікацій

Встановлення двошвидкісної трансмісії на електромобілі дозволяє досягти більшої енергоефективності за рахунок роботи електродвигуна у зоні з високим ККД [1], [2]. При цьому з метою виключення зі складу трансмісії найменш надійного елемента конструкції, а саме синхронізатора, необхідно дослідити інерційні якості тягового електродвигуна для встановлення муфт миттєвого увімкнення [3]. В даному випадку доцільне використання мікропроцесорної системи управління, задачею якої є керування не тільки процесом синхронізації кутових швидкостей, а й положенням муфт [4].

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є вивчення процесів, що відбуваються в процесі перемикання передач двоступеневої несинхронізованої електромеханічної трансмісії. Це дозволить створити раціональну

конструкцію з мінімальною кількістю деталей та алгоритм, який буде закладений у систему керування, що дозволить мінімізувати час перемикання передач без необхідності повної зупинки транспортного засобу.

Математична модель

Моделювання процесу перемикання передач складається з двох варіантів перемикання – в режимі руху з першої на другу, та з другої на першу.

У відповідності до тягових розрахунків, наведених у другому розділі, кінематичної схеми, зображеної на рисунку 1, трансмісія має режим нейтралі, першої та другої передач. Вирівнювання кутових швидкостей з'єднаних валів та зубчатих коліс досягається роботою системи керування, що синхронізує кутові швидкості водила та епіцикла першого планетарного ряду в залежності від поточних умов руху, положення педаль акселератора, швидкості обертання ротора електродвигуна, увімкненої передачі.

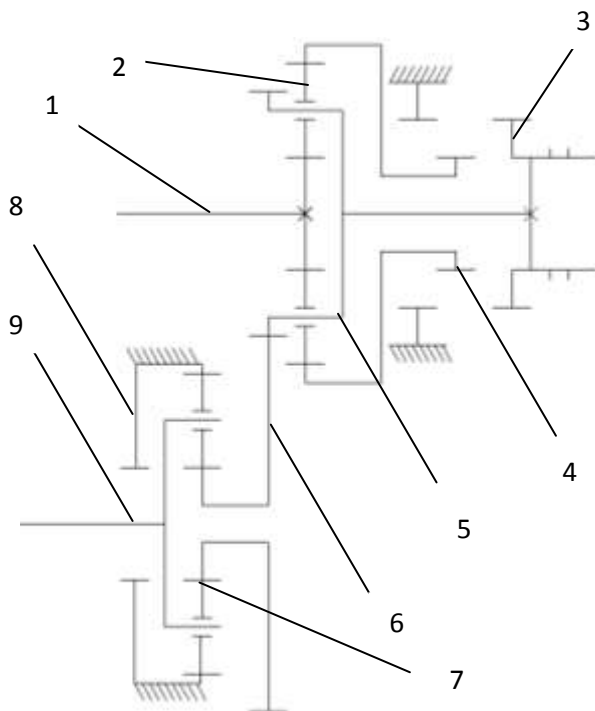


Рисунок 1 - Кінематична схема коробки передач

1 – вхідний вал із сонячною шестернею першого планетарного ряду, 2 – сателіт першого планетарного ряду, 3 – несинхронізована зубчата муфта, 4 – епіцикл першого планетарного ряду, 5 – водило першого планетарного ряду, 6 – спарена проміжна та сонячна шестерня другого планетарного ряду, 7 - сателіт другого планетарного ряду, 8 - епіцикл другого планетарного ряду, 9 – вихідний вал з'єднаний з водилом другого планетарного ряду.

При моделюванні процесу синхронізації кутових швидкостей з'єднаних ланок коробки передач було введено наступні припущення: вимкнення передачі відбувається без затримок; початок моделювання бере відлік з моменту вимкнення попередньої передачі.

Математична модель об'єкту дослідження побудована на основі еквівалентної схеми транспортного засобу (рисунок 2).

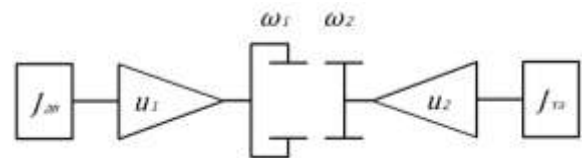


Рисунок 2 - Еквівалентна схема об'єкту дослідження,

де $J_{дв}$ – момент інерції ротора електродвигуна

u_1 – сумарне передавальне відношення, зубчастих коліс, що жорстко з'єднані валом з електродвигуна

ω_1 – кутова швидкість епіцикла першого планетарного ряду

ω_2 – кутова швидкість зубчатої несинхронізованої муфти

u_2 – сумарне передавальне відношення, зубчастих коліс, що жорстко з'єднані з колесами

$J_{тз}$ – момент інерції, що приходить на одне колесо транспортного засобу

Кінетична енергія, що накопичена у обертаючихся валах і шестернях коробки передач та при поступовому русі транспортного засобу має вигляд:

$$T = \frac{m_a \cdot V_a^2}{2} + \frac{J_{\Pi} \cdot \omega_{\Pi}^2}{2}$$

де m_a – маса транспортного засобу, кг, V_a^2 – швидкість руху транспортного засобу, м/с, J_{Π} – момент інерції обертаючихся мас, кг/м², ω_{Π}^2 – кутова швидкість обертаючихся мас, рад/с

Зовнішня швидкісна характеристика тягового електродвигуна ЕМ61 в режимі часткового навантаження та генераторна характеристика наведена на рисунку 3.

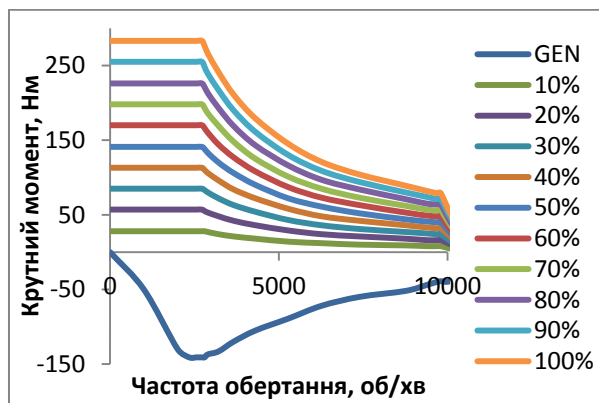


Рисунок 3 - Зовнішня швидкісна характеристика тягового електродвигуна ЕМ61 в режимі часткового навантаження та генераторна характеристика

Еквівалентна математична модель електродвигуна ЕМ61, що враховує зовнішню швидкісну характеристику, моменти інерції та сумарні механічні втрати при обертанні зубчатих коліс, жорстко з'єднаних з валом електродвигуна, зображено на рисунку 4.

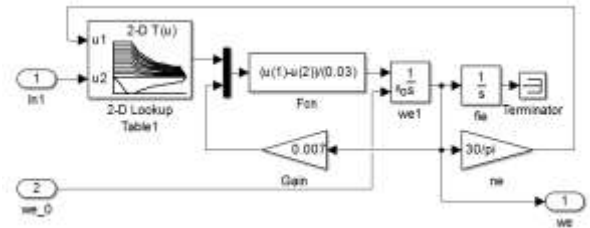


Рисунок 4 - Еквівалентна математична модель електродвигуна ЕМ61

Система рівнянь, що описує процес зміни передач як в режимі активного розгону так і при потраплянні транспортного засобу у складні дорожні умови, складається з двох структур: перша описує обертання ротору електродвигуна жорстко з'єданого із зубчатими передачами та другої, – що описує уповільнення транспортного засобу під час перемикавання передач. Ланцюгом, що з'єднує дві частини рівняння є гальмівний момент, що розвивається на валу електродвигуна, при його переведенні системою керування в режим генератора (при активній акселерації) або крутний момент зовнішньої швидкісної (часткової) характеристики електродвигуна (при переході на нижчу передачу). Система рівнянь для генераторного режиму має вигляд:

$$j_x = \frac{-P_w - P_{\psi} - J_{\Pi\Pi} \cdot \varepsilon_{\Pi\Pi}}{m_a}$$

$$\varepsilon_{\Pi\Pi} = \frac{j_x \cdot u_{\Pi\Pi} \cdot u_{PK}}{r_k}$$

$$\varepsilon_{\Pi\Pi} = \frac{-M_{TP} - M_{ГД} - J_D \cdot \varepsilon_D}{J_{\Pi\Pi}}$$

$$\omega_{2\Pi} = \frac{V_a \cdot u_2 \cdot u_{PK}}{r_k}$$

$$\omega_{1\Pi} = \varepsilon_{\Pi\Pi} dt$$

$$\omega_{1\Pi}^0 =$$

$$V_a^0 = V_{kprj}$$

Система рівнянь при використанні зовнішньої швидкісної (часткової) характеристики має вигляд:

$$j_x = \frac{-P_w - P_\psi - J_{II\Pi} \cdot \varepsilon_{II\Pi}}{m_a}$$

$$\varepsilon_{II\Pi} = \frac{j_x \cdot u_{II\Pi} \cdot u_{PK}}{r_k}$$

$$\varepsilon_{I\Pi} = \frac{-M_{TP} + M_D - J_D \cdot \varepsilon_D}{J_{I\Pi}}$$

$$\omega_{2\Pi} = \frac{V_a \cdot u_2 \cdot u_{PK}}{r_k}$$

$$\omega_{1\Pi} = \varepsilon_{I\Pi} dt$$

$$\omega_{1\Pi}^0 =$$

$$V_a^0 = V_{kpij}$$

де j_x – уповільнення транспортного засобу, м/с²; P_w – сила опору повітря, Н; P_ψ – сила опору кочення коліс, Н; $J_{II\Pi}$ – момент інерції другого планетарного ряду, кг/м²; $\varepsilon_{II\Pi}$ – кутове прискорення другого планетарного ряду, с⁻²; m_a – маса транспортного засобу, кг; $u_{II\Pi}$ – передавальне відношення другого планетарного ряду; u_{PK} – передавальне відношення колісного редуктора; $\varepsilon_{I\Pi}$ – кутове прискорення першого планетарного ряду, с⁻²; M_{TP} – момент тертя у підшипниках першого планетарного ряду, Н; $M_{ГД}$ – гальмівний момент електродвигуна, Н; M_D – момент електродвигуна на зовнішній (частковій) характеристиці, Н; J_D – момент інерції ротора електродвигуна, кг/м²; ε_D – кутове прискорення ротора електродвигуна, с⁻²; $\omega_{2\Pi}$ – кутова швидкість другого планетарного ряду, ; $\omega_{1\Pi}$ – кутова швидкість першого планетарного ряду, с⁻¹; $\omega_{1\Pi}^0$ – кутова швидкість першого планетарного ряду, с⁻¹; V_a^0 – швидкість транспортного засобу.

Результати моделювання

В процесі моделювання емпіричним шляхом були підібрані коефіцієнти роботи ПД-регулятора. Найкращий результат моделювання процесу перемикання на вищу передачу при досягненні швидкості 20 км/год був отриманий при використанні

коефіцієнтів, що занесені до таблиці 1, і склав близько 1,5 с. Даний час може бути суттєво скорочений при зменшенні порогу перемикання передач до 10..15 км/год в залежності від поточних умов руху та сумарного дорожнього опору руху.

Процес синхронізації кутових швидкостей водила (ω_1) та епіцикла першого планетарного ряду (ω_2) зображено на рисунку 5.

При моделюванні процесу перемикання з вищої на нижчу передачу найкращі результати отримані при використанні коефіцієнтів, що занесені до таблиці 2, і склав близько 0,15 с при початковій швидкості 15 км/год. Для цього необхідно розкрутити електродвигун до такої швидкості при якій кутова швидкість обертання епіцикла першого планетарного ряду буде близькою до нуля для його з'єднання з корпусом через муфту.

Таблиця 1 – Коефіцієнти роботи ПД-регулятора при перемиканні на вищу передачу.

Коефіцієнт	Значення
Пропорційний	-3.01146524201251
Інтегральний	0.0545155523246332
Диференціальний	-0.539582385858797

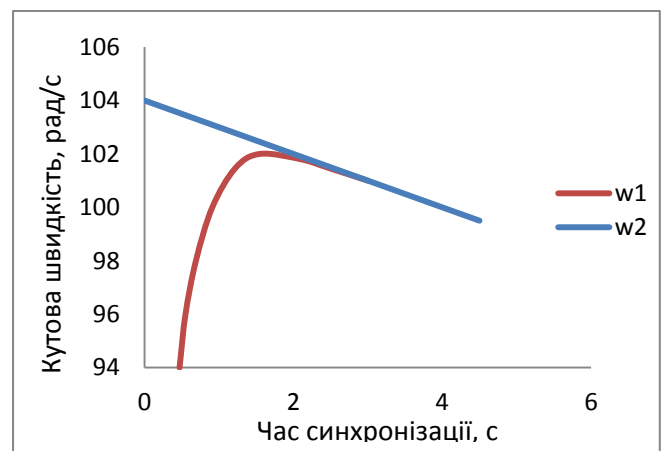


Рисунок 5 - Процес синхронізації кутових швидкостей водила та епіцикла першого планетарного ряду

Таблиця 2 – Коефіцієнти роботи ПД-регулятора при перемиканні на нижчу передачу.

Коефіцієнт	Значення
Пропорційний	-5
Інтегральний	-1
Диференціальний	-2

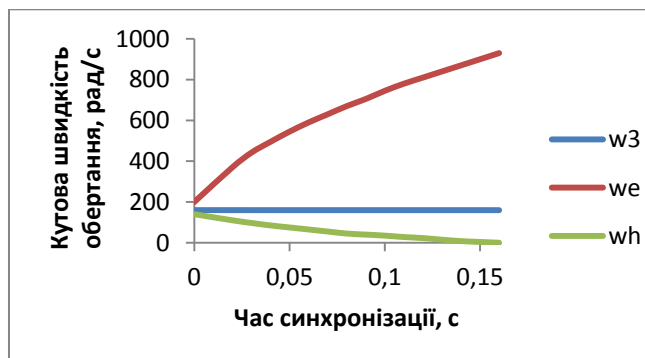


Рисунок 6 - Процес зменшення кутової швидкості епіцикла при збільшенні кутової швидкості тягового електродвигуна

Висновки

Спираючись на проведені дослідження, визначено напрями подальших досліджень процесів, що відбуваються в процесі перемикання передач. Розроблена математична модель дозволяє апробувати отримані знання на масштабній фізичній моделі об'єкта дослідження.

Література

1. Polychronis Spanoudakis 1,*, Nikolaos C. Tsourveloudis 1, Lefteris Doitsidis 2 and Emmanuel S. Karapidakis 3, Experimental Research of Transmissions on Electric Vehicles' Energy Consumption
2. C Rențea 1,*, M Oprean 1, M Bățăuș 1 and G Frățilă 1, 1 University Politehnica of Bucharest, Automotive Engineering Department, Splaiul Independenței Street No. 313, Romania, The influence of multi-speed transmissions on electric vehicles energy consumption
3. Клименко В.І., Михалевич М.Г., Сільченко М.М. Моделювання робочого процесу синхронізації у десятиступінчатій коробці передач вантажного автомобіля // Автомобільний транспорт, вип. 29, 2011, с.56 – 61.
4. Клепников В.Б., Сакур, Е.В., Програмная синхронизация положений валов коробки передач электропривода электромобиля // ISSN 2079-8024. Вісник НТУ «ХПІ», 2017. 27(1249), с. 445 – 448.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СИНХРОНИЗАЦИИ В ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ

**В.И. Клименко, профессор, к.т.н., М.Г. Михалевич, доцент, к.т.н.,
А.В. Еременко, аспирант, ХНАДУ**

Аннотация. Рассмотрен процесс переключения несинхронизированных планетарных рядов в двухступенчатой электромеханической трансмиссии транспортного средства специального назначения.

Ключевые слова: время синхронизации, электродвигатель, коробка передач.

MODELLING OF OPERATION PROCEDURE OF SYNCHRONIZATION IN ELECTROMECHANICAL TWO-SPEED PLANETARY GEAR BOX

**V. Klimenko, Professor, Candidate of Technical Science, N. Mykhalevych,
Candidate of Technical Science, A. Yeremenko, postgraduate, KhNANU**

Abstract. The process of switching unsynchronized planetary gear sets in a two-stage electromechanical transmission of a special-purpose vehicle is considered.

Key words: synchronization time, electrical engine, gear box.