

А. П. КОЖУШКО, Є. С. ПЕЛИПЕНКО, В. Д. ДАНИЛЕНКО, С. С. САРКИСОВ

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ ДЛЯ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА

Розглянуто актуальні питання проектування та синтезу параметрів електромеханічної (гібридної) трансмісії колісного трактора в умовах зростаючих вимог до енергоефективності та зниження екологічного навантаження. Показано, що впровадження гібридних та електромеханічних трансмісій у сільськогосподарську техніку є перспективним напрямом розвитку сучасного тракторобудування, оскільки дозволяє забезпечити плавне регулювання швидкості та крутного моменту без розриву потоку потужності, а також узгодити характеристики силового агрегату й навантаження. Метою дослідження є обґрунтування вибору схеми електромеханічної трансмісії на основі принципу суматора потоків енергії та виконання її кінематичного і силового аналізу. Обґрунтовано схему трансмісії з двома планетарними механізмами, у якій один з елементів першого механізму є заблокованим, а другий виконує функцію суматора потоків потужності.

Ключові слова: трактор, електромеханічна трансмісія, гібрид, синтез, аналіз, кутова швидкість, крутний момент.

A. KOZHUSHKO, Ye. PELYPENKO, V. DANYLENKO, S. SARKISOV

SYNTHESIS PARAMETERS OF AN ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION FOR A WHEELED TRACTOR

The paper addresses topical issues of design and parameter synthesis of an electromechanical transmission for a wheeled tractor under increasing requirements for energy efficiency and reduction of environmental impact. It is shown that the implementation of hybrid and electromechanical transmissions in agricultural machinery is a promising direction in the development of modern tractor engineering, as it enables smooth control of speed and torque without interruption of the power flow and ensures proper matching between the power unit characteristics and the load. The results of domestic and international studies devoted to tractor electrification, selection of electric drive architectures, parameters of electric machines and transmission components, as well as methods for modeling and optimization of power flows, are analyzed. It is established that most existing works consider the electromechanical transmission as a part of the electric drive system as a whole, which limits the possibility of its targeted parameter synthesis with regard to the specific operating conditions of a wheeled tractor. The aim of the study is to substantiate the selection of an electromechanical transmission layout based on the power-flow summation principle and to perform its kinematic and force analysis. A transmission scheme with two planetary gear sets is proposed, in which one element of the first gear set is locked, while the second gear set functions as a power-flow summator. It is shown that transmitting the power flow from the internal combustion engine through the sun gear of the second planetary gear set ensures a well-defined distribution of energy flows and creates prerequisites for improving transmission efficiency. The obtained results can be used as a basis for further synthesis of parameters of electromechanical transmissions for wheeled tractors.

Key words: tractor, electromechanical transmission, hybrid, synthesis, analysis, angular speed, torque.

Вступ. Постійний розвиток технологій у сфері автомобіле- і тракторобудування спрямований, перш за все, на зменшення викидів забруднюючих газів, що призводить до впровадження гібридних технологій. І хоча ці технології традиційно використовувалися в автомобільних трансмісіях, зараз ведуться роботи з впровадження гібридних трансмісій у транспортні засоби спеціального призначення, такі як сільськогосподарські трактори, інженерна та будівельна техніка тощо. Проектування гібридних трансмісій у спеціалізованих транспортних засобах передбачає використання одного або кількох електромоторів – це передбачає використання багатьох варіантів конструкції гібридної трансмісії, від простіших, таких як паралельні схеми, до складніших послідовно-паралельних схем.

Використання технології, заснованої на аналізі взаємодії двох потоків потужності в гібридних трансмісіях, спрямоване на задоволення експлуатаційних вимог сільськогосподарського засобу. Експлуатаційні показники включають, перш за все, показники швидкості та енергії. Тому при проектуванні системи трансмісії передбачається, що будуть задоволені вимоги транспортного засобу до швидкості та енергії. Конструкція будь-якої

безступінчастої трансмісії (електромеханічної або гідрооб'ємно-механічної) повинна забезпечувати плавну зміну передавального числа в широкому діапазоні без ривків і фіксованих ступенів. Її ключовим завданням є узгодження характеристик двигуна і навантаження, завдяки чому силовий агрегат може працювати в оптимальній зоні з мінімальною витратою палива або максимальною ефективністю. Така трансмісія повинна охоплювати широкий діапазон вихідних швидкостей і крутних моментів, забезпечуючи рух на дуже малих швидкостях з великим тягловим зусиллям і на високих транспортних швидкостях із зменшеними втратами. Вона має забезпечувати можливість реверсу без додаткових механічних вузлів та гарантувати високий рівень керованості й автоматизації, включно зі стабілізацією швидкості при змінних зовнішніх навантаженнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика синтезу параметрів електромеханічної трансмісії для колісного трактора останніми роками набуває зростаючої актуальності у зв'язку з глобальною тенденцією до електрифікації сільськогосподарської техніки, підвищення вимог до енергоефективності та зниження екологічного навантаження [1 – 2]. Електромеханічна трансмісія найчастіше розглядається як складова електричного або гібридного силового приводу трактора, при цьому значна увага приділяється вибору структури приводу, параметрів електричних машин та способів керування потоками потужності [3 – 4]. Однією з небагатьох робіт, у яких безпосередньо розглядається синтез параметрів електромеханічної трансмісії трактора, є дослідження, в якому запропоновано метод визначення потужності тягових електродвигунів і параметрів планетарних передач з урахуванням поділу режимів роботи на транспортний і технологічний [5]. У цій роботі показано, що правильний вибір передавальних чисел і характеристик електродвигунів дозволяє забезпечити необхідний тягово-швидкісний діапазон без застосування багатоступеневих механічних коробок передач, що є важливим для спрощення конструкції трансмісії.

У низці публікацій електромеханічна трансмісія аналізується через призму системного моделювання електричного трактора [6 – 7]. Автори таких робіт будують математичні та імітаційні моделі, які поєднують електродвигун, систему накопичення енергії та механічну частину трансмісії, і на їх основі досліджують динаміку руху, енергоспоживання та ефективність приводу. Отримані результати свідчать, що параметри трансмісії істотно впливають на роботу електродвигуна, зокрема на зони його високого коефіцієнта корисної дії, що підтверджує необхідність спільного синтезу параметрів електричної машини та трансмісійних елементів. Окремий напрям досліджень присвячений багатокритеріальній оптимізації параметрів трансмісії електричних тракторів із двома або більше електродвигунами [8]. У таких роботах застосовуються сучасні алгоритми оптимізації та методи машинного навчання для визначення передаточних чисел і розподілу потужності між електродвигунами з метою скорочення часу розгону, зниження втрат енергії та підвищення загальної ефективності приводу.

Разом з тим, у більшості зарубіжних публікацій електромеханічна трансмісія розглядається як частина електричного приводу в цілому, а не як самостійний об'єкт синтезу, що обмежує можливість прямого використання отриманих результатів для проектування конкретних трансмісійних схем колісних тракторів [4]. Це формує наукову прогалину, пов'язану з недостатньою формалізацією методів вибору параметрів електромеханічної трансмісії з урахуванням специфічних умов роботи трактора, зокрема взаємодії рушія з ґрунтом та широкого діапазону тягових навантажень [9].

Питання електромеханічних трансмісій трактора розглядаються переважно в контексті загального розвитку трансмісійних систем і тенденцій електрифікації [9, 10]. В оглядових роботах вітчизняних авторів аналізується еволюція механічних, гідромеханічних, безступінчастих і гібридних трансмісій, при цьому підкреслюється перспективність електромеханічних схем завдяки можливості плавного регулювання швидкості та крутного моменту без розриву потоку потужності [9]. Окреме місце займають дослідження, присвячені мехатронним та двопотоковим трансмісіям, у яких обґрунтовується доцільність застосування

планетарних механізмів у поєднанні з електричними машинами для підвищення енергоефективності та керованості руху трактора [5]. Суттєвий науковий інтерес становлять роботи, присвячені синтезу параметрів безступінчастих трансмісій колісних тракторів [10, 11]. Незважаючи на те, що ці дослідження орієнтовані переважно на гідрооб'ємно-механічні трансмісії, запропоновані в них методи вибору передавальних чисел, аналізу енергетичних потоків та оцінки впливу параметрів трансмісії на тягово-швидкісні показники можуть бути адаптовані для синтезу параметрів електромеханічної трансмісії з урахуванням специфіки електричного приводу.

Таким чином, основна увага приділяється електрифікації тракторів, оптимізації електроприводів і систем керування, тоді як питання комплексного синтезу параметрів електромеханічної трансмісії колісного трактора залишаються недостатньо систематизованими. Це обґрунтовує актуальність подальших досліджень, спрямованих на розробку узагальненої методики синтезу параметрів електромеханічної трансмісії колісного трактора з урахуванням експлуатаційних режимів та вимог до енергоефективності.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою роботи є аналіз та обґрунтування вибору схеми електромеханічної трансмісії колісного трактора на основі принципу суматора потоків енергії. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтування вибору схем електромеханічної трансмісії;
- кінематичний та силовий аналіз можливих схем електромеханічної трансмісії.

Вибір схем електромеханічної трансмісії. Вибір раціональної схеми безступінчастої електромеханічної трансмісії ґрунтується на принципах наукового пошуку прийнятних кінематичних та силових показників. Продукування можливих схем трансмісій базується на використанні планетарної передачі, яка складається з двох механізмів, на вихідній ланці трансмісії, відіграючи тим самим роль суматора потоків потужності. Розглянемо на Рис. 1 можливу комбінацію ланок електромеханічної трансмісії.

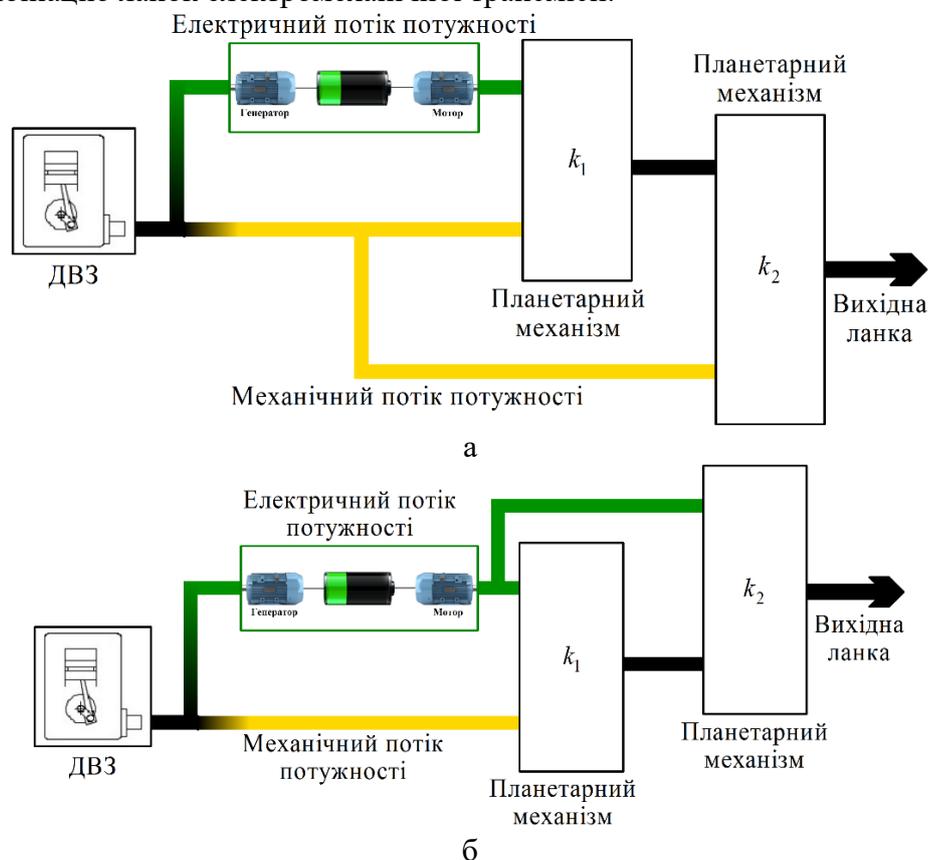


Рис. 1 – Можлива комбінація ланок електромеханічної трансмісії:
а – переважання механічної гілки; б – переважання електричної гілки

Аналізуючи Рис. 1 відмітимо, що такі схемні рішення мають свої переваги, а саме забезпечується нульовий стартовий рух засобу за рахунок забезпечення урівноваження потоків потужності, які формуються електричним двигуном та двигуном внутрішнього згоряння. Проте використання таких схем при побудові електромеханічної трансмісії не є доречним, адже в таких випадках одразу помітно переважання однієї гілки потужності над іншою. Дані схемні рішення зазнають явища циркуляції потужності [12, 13], яке суттєво знижує ефективність трансмісії та підвищує енергетичні втрати. Окрім того, схеми з Рис. 1 мають складний алгоритм керування та більшу залежність від працездатності електричних або механічних (двигун внутрішнього згоряння) компонентів. У тягових і транспортних режимах експлуатації, що характерні для сільськогосподарських тракторів, такі схеми може бути менш економічно доцільними та менш стійкими до перевантажень. Тому доцільним є розгляд схем (Рис. 2), в яких один з елементів першого планетарного механізму є заблокованим, а другий планетарний механізм буде суматором потоків енергії.

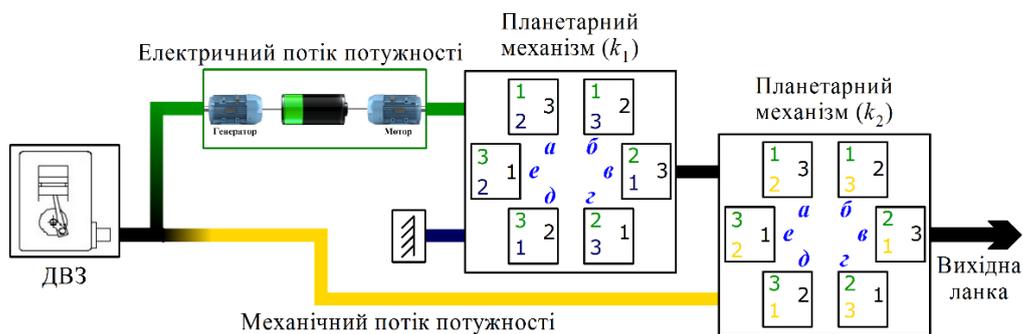


Рис. 2 – Концептуальна схема безступінчастої електромеханічної трансмісії, що побудована за принципом суматора потоків потужності

Аналізуючи схему з Рис. 2, відмітимо, що блокування однієї ланки першого планетарного механізму дає можливість сформувати жорсткий механічний шлях передачі потужності, що забезпечує високий ККД у режимах тривалої роботи під значним навантаженням. Для сільськогосподарських тракторів це відіграє значну роль, адже більшість експлуатаційних режимів характеризуються великими тяговими зусиллями, нестабільним крутним моментом і високою тепловою напруженістю силових компонентів.

Блокування одного з елементів першого планетарного механізму (k_1) дає змогу передавати пікові та ударні навантаження без надмірного навантаження на електромашини. Тобто силовий потік проходить переважно через механічні зубчасті пари, а не через електричні машини, завдяки чому великі або раптові навантаження сприймаються механічною частиною трансмісії, а електромашини не перевантажуються. Це позитивно впливає на довговічність елементів трансмісії й підвищує надійність у складних умовах експлуатації. Також спрощується система керування: у заблокованому стані трансмісія працює стабільно та не потребує постійного енергетичного балансування між двигуном і електричними машинами. Це також створює резервний механічний режим руху на випадок відмови електроніки або електромотора, що підвищує функціональність трактора.

Наступним кроком, необхідно відкинути можливі комбінації з'єднань з елементами планетарних механізмів, які суперечать конструктивній реалізації. Так, дивлячись на можливі комбінації першого планетарного механізму (k_1) відмітимо, що можливим з конструктивної точки зору доцільним є блокування коронної шестерні (позначення «2» на Рис. 2) або водила (позначення «3») з корпусом трансмісії. Блокування сонячної шестерні в такому випадку унеможливлено, що дає змогу відкинути схеми k_1 (в, д) з Рис. 2.

Аналізуючи роботу другого планетарного механізму (k_2), необхідно враховувати те, що він є суматором вихідної потужності, яка після нього потрапляє на ходозменшувач та роздавальну коробку перемикачів передачі трактора. Але, також необхідно враховувати роботу валу

відбору потужності, який зазвичай запитується напряму від колінчастого валу двигуна внутрішнього згоряння. Зважаючи на це, цілком доречно розглядати схеми з комбінаціями з'єднання другого планетарного механізму (k_2) в яких механічний потік потужності від двигуна внутрішнього згоряння потрапляє на сонячну шестерню (позначення «1»), тобто схеми k_2 (в, д) з Рис. 2. Таким чином, кількість схем, які необхідно дослідити зменшуються, їх кількість показана на Рис. 3.

Наступним кроком, необхідно відмітити те, що пошук можливих схем комбінацій в електромеханічній трансмісії проводиться у відносних величинах. Для виконання цієї задачі необхідно враховувати механічні характеристики (Рис. 4) двигуна внутрішнього згоряння та електричного мотора. Оскільки вирішення поставленої задачі досягається шляхом обчислень кінематичних та силових показників роботи електромеханічної трансмісії у відносних величинах, тоді скористаємося класичним математичним апаратом.

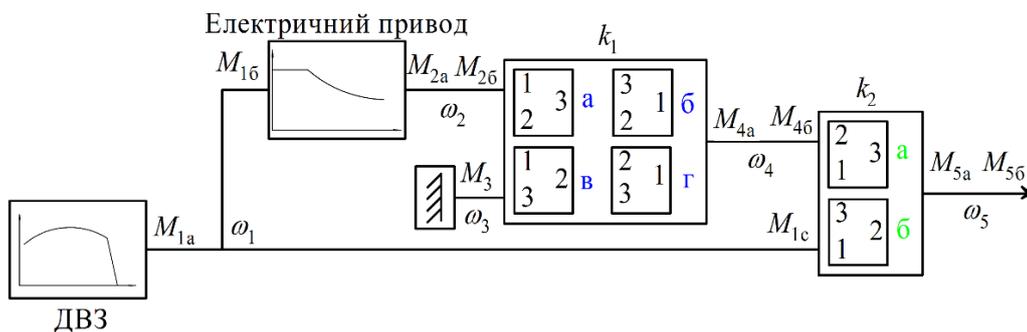


Рис. 3 – Структурна схема електромеханічної трансмісії з можливими комбінаціями з'єднання планетарних механізмів

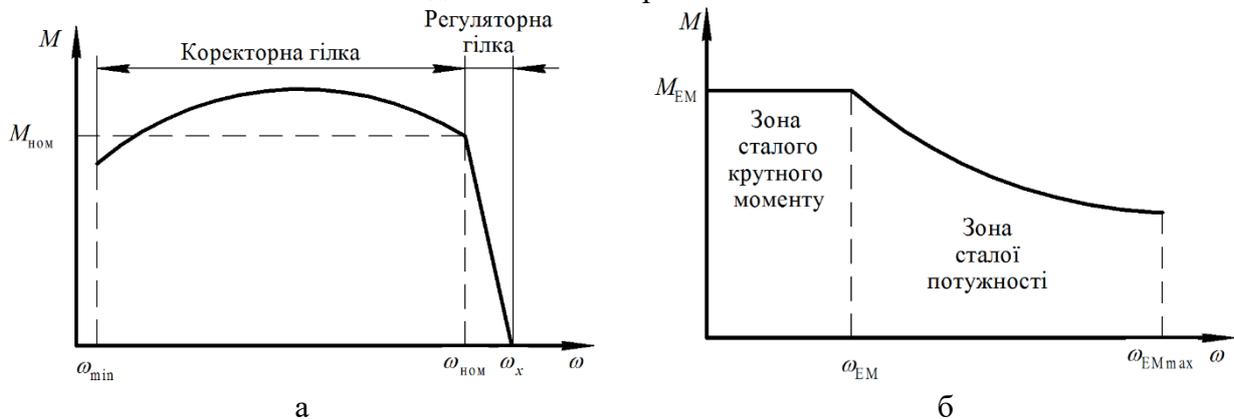


Рис. 4 – Умовні характеристики силових елементів трансмісії:

а – зовнішня швидкісна характеристика двигуна внутрішнього згоряння; б – механічна характеристика електричного мотора

Далі виникає необхідність знаходження взаємопов'язаних величин для функціонування двигуна внутрішнього згоряння та електричного мотору. Для цього прийемо наступну вихідну кінематичну залежність:

$$\frac{\omega_1}{\omega_{EM}} = i_E \quad (1)$$

де: ω_1 – кутова швидкість колінчастого валу двигуна внутрішнього згоряння; ω_{EM} – кутова швидкість, що характеризує перехід від зони сталого крутного моменту до зони сталої потужності; i_E – умовний показник, який характеризує залежність кутових швидкостей.

У випадках коли:

- $i_E < 1$ – це характеризує переважання кутової швидкості валу електричного мотора над кутової швидкості двигуна внутрішнього згоряння;

- $i_E = 1$ – характеризує рівнозначність кутових швидкостей ($\omega_{\text{ном}} = \omega_{\text{ЕМ}}$);

- $i_E > 1$ – характеризує переважання кутової швидкості двигуна внутрішнього згоряння над кутовою швидкістю електричного мотора у два рази.

Що стосується силового узгодження залежностей, то на даному етапі він не проводитиметься. При дослідженні зміни конструктивних параметрів планетарних механізмів прийнято здійснювати пошук в межах $k_1 \in [-1; -3]$ та $k_2 \in [-1; -3]$. Обґрунтування вибору таких діапазонів зміни конструктивних параметрів ґрунтується на особливостях будови планетарних механізмів, що використовуються в автомобіле- і тракторобудівних галузях.

Кінематичний та силовий аналіз схем електромеханічної трансмісії. Для цього використаємо класичну оцінку за зміною діапазону кутових швидкостей (ω_5 / ω_1) та крутних моментів ($M_{5\delta} / M_{1a}$) двопотокової трансмісії [10]. Розглянемо на прикладі схеми з Рис. 3 з параметрами $k_1(a)$ та $k_2(a)$ зміну діапазону кутових швидкостей та крутних моментів двопотокової трансмісії:

$$\begin{cases} \omega_2 = \omega_{\text{ЕМ}} \Rightarrow \omega_2 = \omega_1 / i_E; \\ \omega_2 - k_1 \cdot \omega_3 + (k_1 - 1) \cdot \omega_4 = 0 \Rightarrow \omega_4 = (\omega_1 / i_E) / (1 - k_1); \\ \omega_1 - k_2 \cdot \omega_4 + (k_2 - 1) \cdot \omega_5 = 0 \Rightarrow \omega_5 = \left(k_2 \left(\frac{\omega_1 / i_E}{1 - k_1} \right) - \omega_1 \right) / k_2 - 1; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_{5a} + M_{5\delta} = 0 \Rightarrow M_{5a} = -M_{5\delta}; \\ k_2 \cdot M_{1c} + M_{4\delta} = 0 \Rightarrow M_{4\delta} = -k_2 \cdot M_{1c}; \\ M_{1c} + M_{4\delta} + M_{5a} = 0 \Rightarrow M_{1c} = \frac{M_{5\delta}}{1 - k_2} \Rightarrow M_{4\delta} = \frac{k_2 \cdot M_{5\delta}}{k_2 - 1}; \\ M_{4a} + M_{4\delta} = 0 \Rightarrow M_{4a} = \frac{k_2 \cdot M_{5\delta}}{1 - k_2}; \\ k_1 \cdot M_{2\delta} + M_3 = 0 \Rightarrow M_3 = -k_1 \cdot M_{2\delta}; \\ M_{2\delta} + M_3 + M_{4a} = 0 \Rightarrow M_{2\delta} = \frac{M_{4a}}{k_1 - 1} = \frac{k_2 \cdot M_{5\delta}}{(1 - k_2) \cdot (k_1 - 1)}; \\ M_{2a} + M_{2\delta} = 0 \Rightarrow M_{2a} = M_{\text{ЕМ}} = \frac{k_2 \cdot M_{5\delta}}{(k_2 - 1) \cdot (k_1 - 1)}; \\ M_{1\delta} + M_{2a} = 0 \Rightarrow M_{1\delta} = \frac{k_2 \cdot M_{5\delta}}{(1 - k_2) \cdot (k_1 - 1)}; \\ M_{1a} + M_{1\delta} + M_{1c} = 0 \Rightarrow M_{1a} = \frac{k_2 \cdot M_{5\delta}}{(k_2 - 1) \cdot (k_1 - 1)} + \frac{M_{5\delta}}{k_2 - 1} = \\ = \frac{M_{5\delta} (k_2 + k_1 - 1)}{(k_2 - 1) \cdot (k_1 - 1)}. \end{cases} \quad (3)$$

Відмітимо, що рівняння $M_{1\delta} + M_{2a} = 0$ встановлює механічний зв'язок між електричним генератором та мотором, який означає, що необхідний крутний момент на валу генератора дорівнює крутному моменту мотору, але з протилежним знаком.

Далі виконаємо кінематичний та силовий аналіз можливих схем електромеханічної трансмісії, що представлені на Рис. 3, визначаючи зміну діапазону кутових швидкостей (ω_5 / ω_1) та крутних моментів ($M_{1a} / M_{5\delta}$) двопотокової трансмісії при варіюванні

Наступним кроком необхідно в загальному вигляді обчислити можливий діапазон зміни кутових швидкостей та крутних моментів. Задля цього проаналізуємо кожну схему з Табл. 3. Результати показано на Рис. 5 – 12, де а – кутові швидкості; б – крутні моменти.

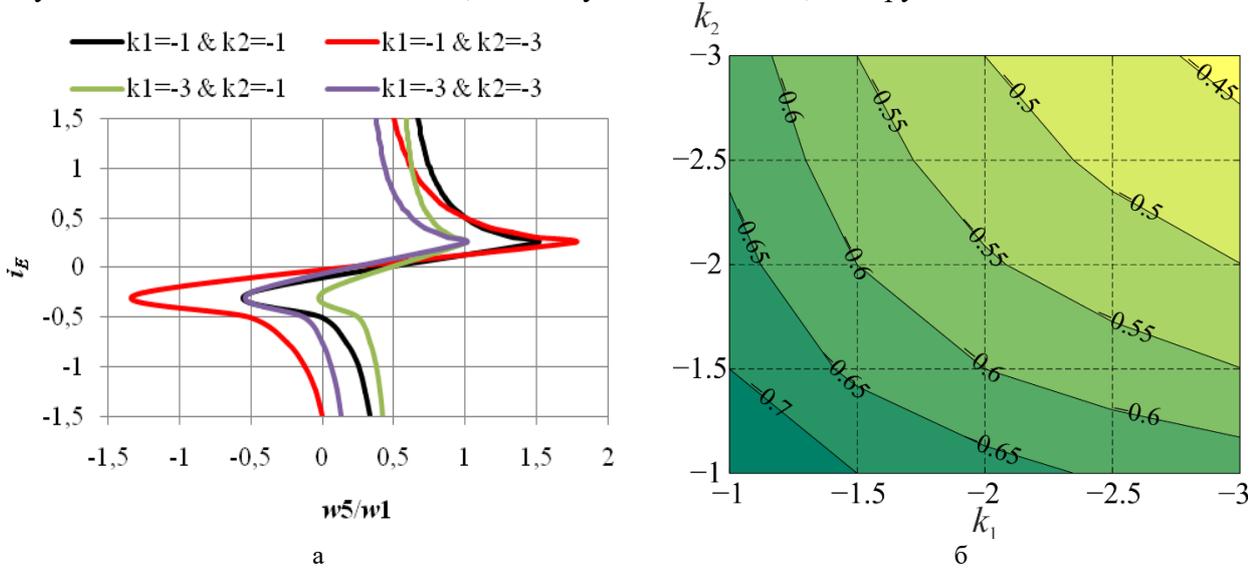


Рис. 5 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 1 з Табл. 1

Аналізуючи результати з Рис. 5, відмітимо, що Схема 1 з Табл. 1 має бажаний діапазон зміни кутових швидкостей $(\omega_5 / \omega_1) = 1$ (що свідчить про те, що вхідна кутова швидкість дорівнює вихідній) спостерігається при $i_E = 0,4 \dots 0,75$, тобто кутова швидкість електромотора повинна бути вищою за кутову швидкість валу двигуна внутрішнього згорання в 2,75 та 1,33 рази, відповідно. Окрім того, результати показують, що при обертанні валу електромотора в зворотному напрямі може забезпечуватись реверсивний рух. Що стосується зміни діапазону кутових моментів, то з Рисунку 4.5б помітно, що отримані значення є від’ємними та $|M_{1a} / M_{5б}| < 1$ – це свідчить про коректність розподілу крутного моменту в електромеханічній трансмісії. Таким чином, Схема 1 з Табл. 1 має великі перспективи для подальшого використання.

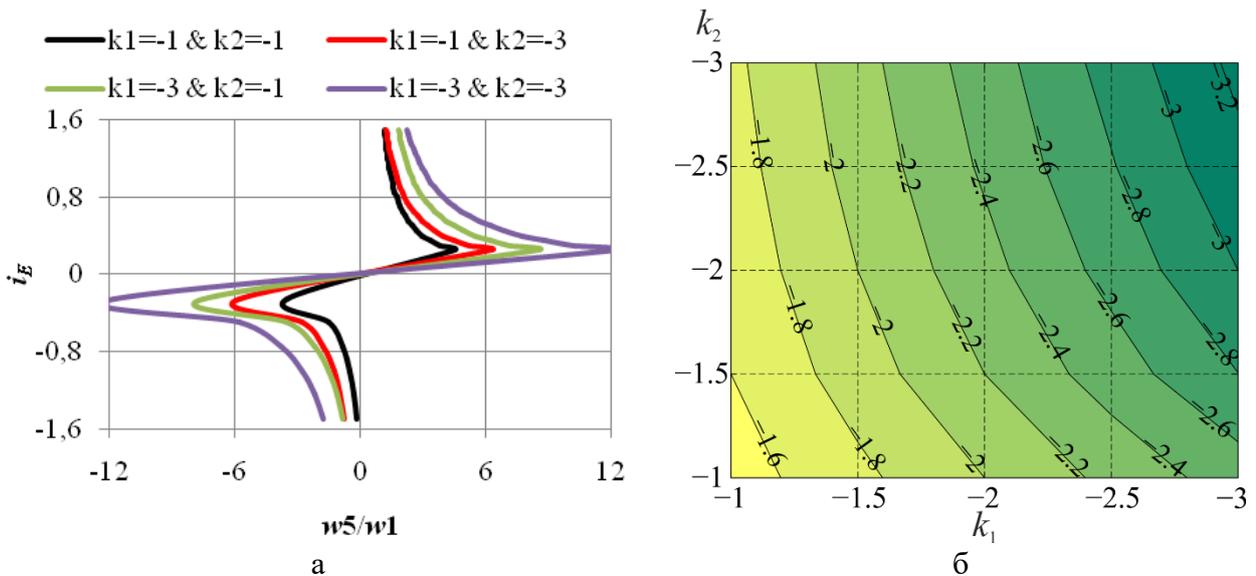


Рис. 6 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 2 з Табл. 1

Результати з Рис. 6 показують, що Схема 2 з Табл. 1 має схожу зміну діапазону кутових швидкостей зі Схемою 1 (Рисунок 4.5а), проте зміна діапазону крутних моментів (Рис. 6б)

значно переважає значення $|M_{1a} / M_{5б}| > 1$, що свідчить про перевантаження двигуна внутрішнього згоряння. І якщо для вихідної кутової швидкості такий результат є прийнятним, то для вхідного крутного моменту такі показники є не прийнятними. Зважаючи на це, Схема 2 з Табл. 1 в подальшому розглядатися не буде.

З Рис. 7 помітно, що Схема 3 з Табл. 1 має зворотній рух, в порівнянні зі Схемами 1 і 2, тобто діапазон зміни кутових швидкостей (Рис. 7а) має від'ємні значення. Діапазон зміни крутних моментів показав, що для даної схеми унеможливлено використання комбінації планетарних механізмів з $k_1 = k_2$. Зважаючи вище перераховане недоцільно використовувати Схему 3 для подальших розрахунків.

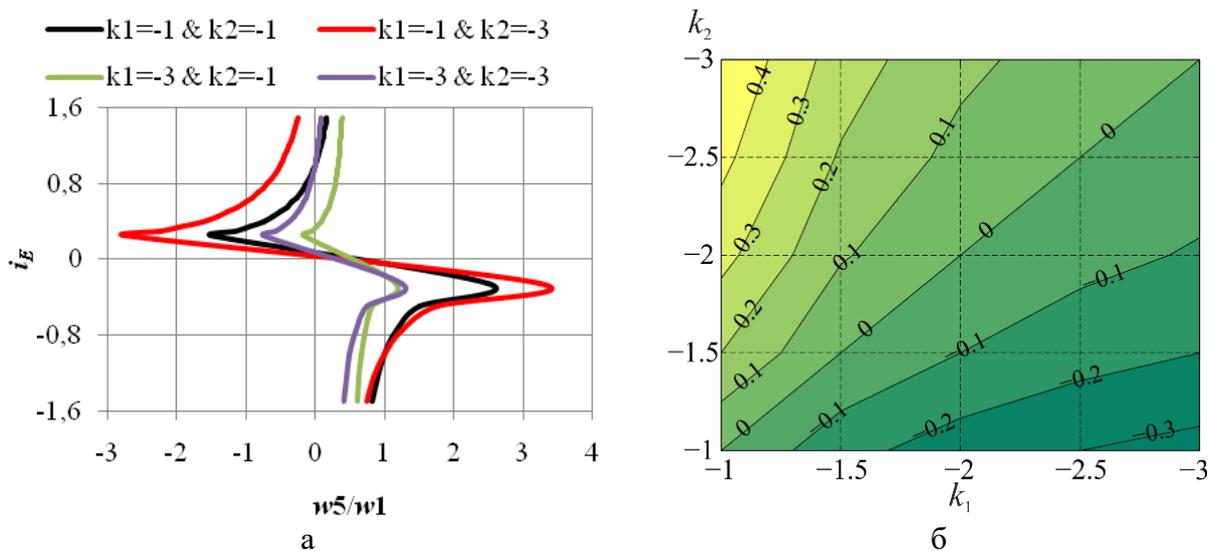


Рис. 7 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 3 з Табл. 1

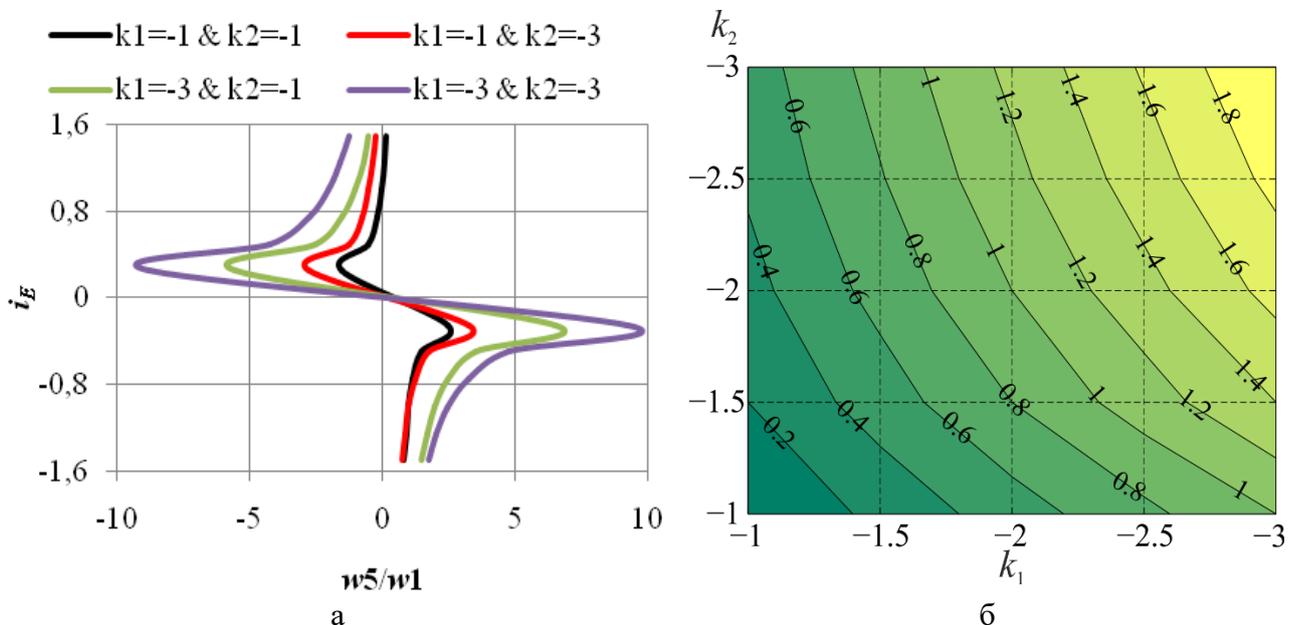


Рис. 8 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 4 з Табл. 1

Результати з Рис. 8 свідчать, що Схема 4 з Табл. 1 має схожу тенденцію до руху, як й Схема 3 (Рис. 7а). Окрім того, зміна діапазону крутних моментів має позитивні значення, що є неприйнятним, тому використовувати Схему 4 для подальших розрахунків недоцільно.

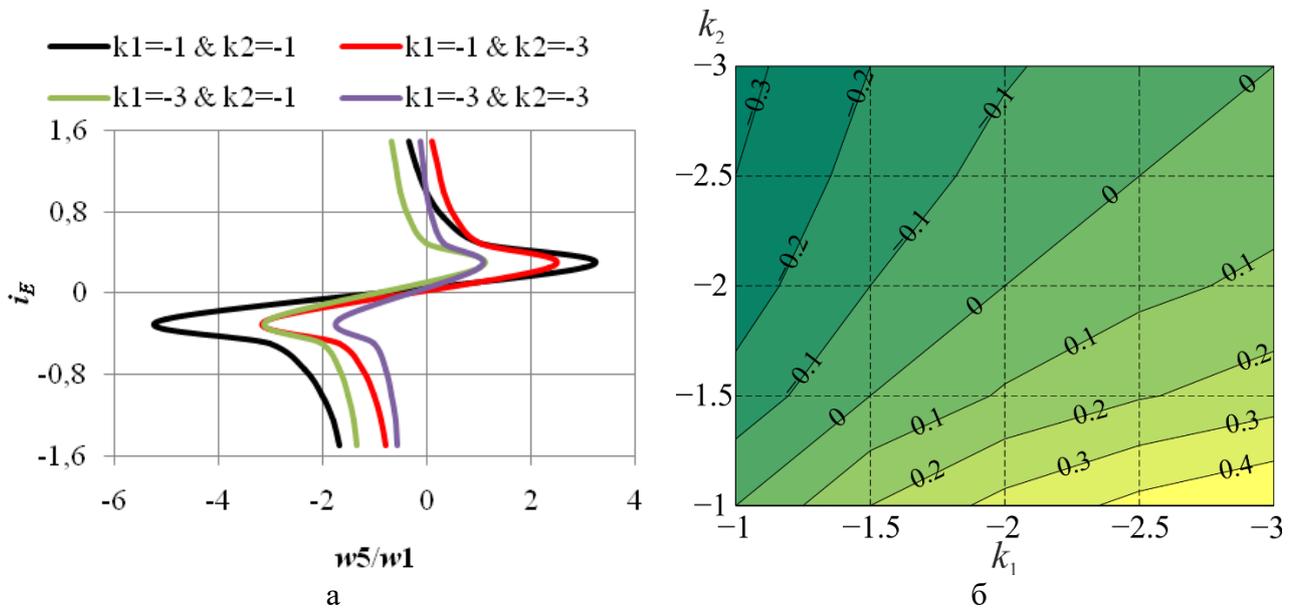


Рис. 9 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 5 з Табл. 1

Результати з Рис. 9 свідчать, що Схеми 5 з Табл. 1 має схожу тенденцію до руху, як й Схеми 1 (Рис. 5а) та Схеми 2 (Рис. 6а). Але, зміна діапазону крутних моментів має схожу тенденцію до Схеми 3 (Рис. 7б), що є неприйнятним, тому використовувати Схему 5 для подальших розрахунків недоцільно.

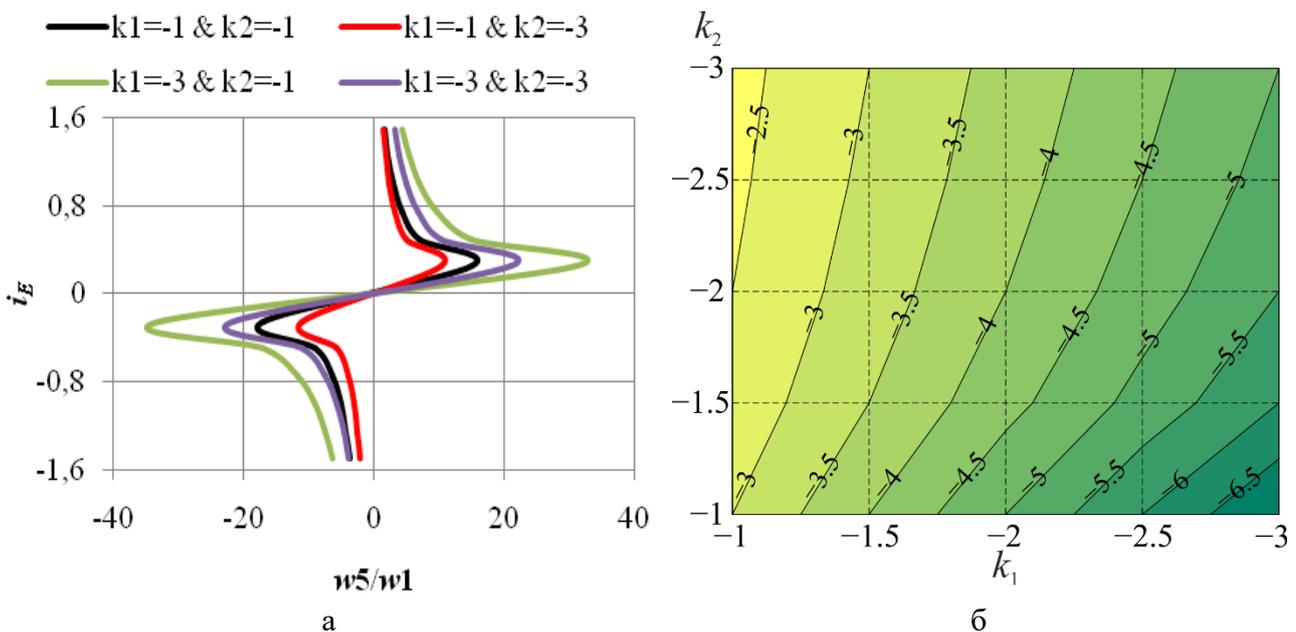


Рис. 10 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 6 з Табл. 1

Результати з Рис. 10 свідчать, що Схеми 6 з Табл. 1 має схожу тенденцію, як до зміни діапазону кутових швидкостей, так й до зміни діапазону крутних моментів зі Схемою 2 (Рис. 6). Зважаючи на це, Схему 6 з Табл. 1 в подальшому розглядатися не буде. Результати з Рис. 11 та 12 свідчать, що Схеми 7 та 8 з Табл. 1 мають схожі тенденції, як до зміни діапазону кутових швидкостей, так й до зміни діапазону крутних моментів зі Схемою 4 (Рис. 8). Зважаючи на це, Схеми 7 та 8 з Табл. 3 в подальшому розглядатися не буде.

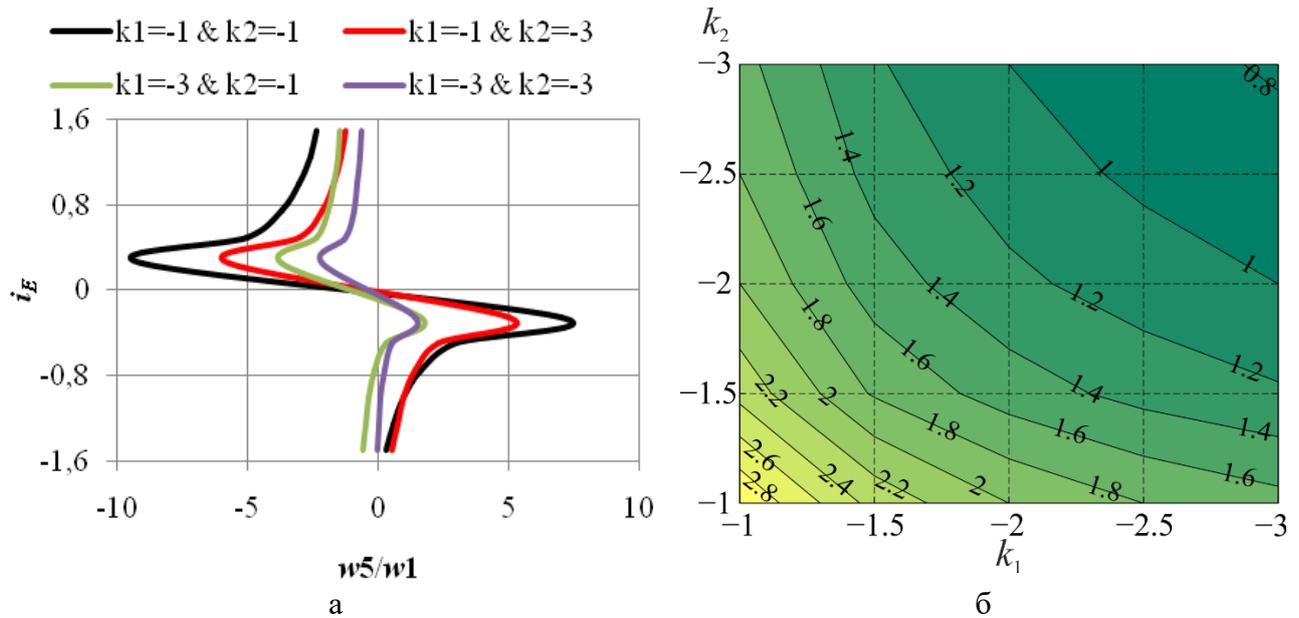


Рис. 11 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 7 з Табл. 1

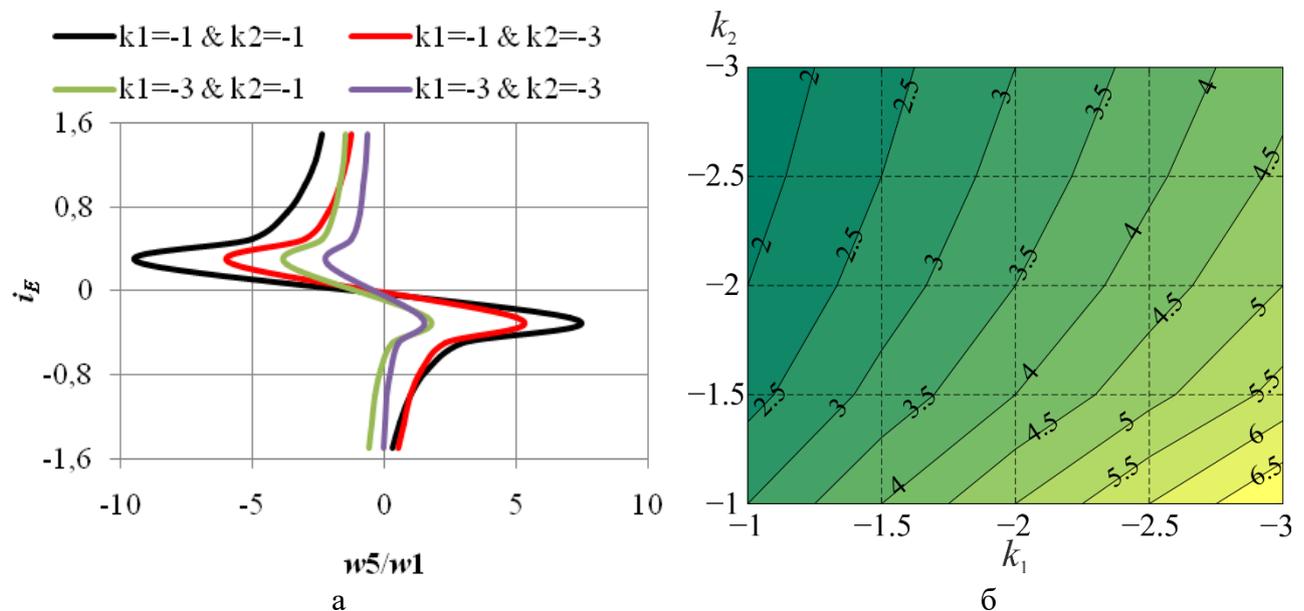


Рис. 12 – Аналіз результатів зміни діапазонів для Схеми 8 з Табл. 1

Таким чином, з огляду на умови проектування, які базуються на тому, що один з елементів першого планетарного механізму є заблокованим, а другий планетарний механізм буде суматором потоків енергії. При чому потік потужності від двигуна внутрішнього згоряння повинен проходити скрізь сонячну шестерню другого планетарного механізму, то найбільш пріоритетною для досліджень є Схеми 1 з Табл. 1. В подальших дослідженнях необхідно адаптувати отриману схему електромеханічної передачі під трансмісію трактора серії ХТЗ-248К.20.

Висновки. З урахуванням прийнятих умов проектування електромеханічної трансмісії, за яких один з елементів першого планетарного механізму є заблокованим, а другий планетарний механізм виконує функцію суматора потоків енергії, встановлено доцільність використання конкретної схеми, у якій потік потужності від двигуна внутрішнього згоряння передається через сонячну шестерню другого планетарного механізму. Така структура забезпечує чітко визначений розподіл енергетичних потоків, спрощує аналіз режимів роботи трансмісії та створює передумови для підвищення ефективності її функціонування, що обґрунтовує вибір

для подальших досліджень. Обрана схема дає змогу забезпечити крутний момент від 43,75% до 75% на валу двигуна внутрішнього згорання залежно від конструктивних параметрів планетарних механізмів.

Подяка. Загальний підхід розроблено в рамках науково-дослідного проєкту «Наукове обґрунтування підходів до створення гібридних силових установок об'єктів інженерно-будівельної техніки» (№ 0125U000240).

Список літератури:

1. Pan Y., Zhong K., Xie Y., Pan M., Guan W., Li L., Liu C., Man X., Zhang Z., Li M. A Review of Hybrid Vehicles Classification and Their Energy Management Strategies: An Exploration of the Advantages of Genetic Algorithms. Algorithms. – 2025. – Vol. 18(354). <https://doi.org/10.3390/a18060354>
2. Scolaro E., Beligoj M., Perez Estevez M., Alberti L., Renzi M., Mattetti M. (2021). Electrification of Agricultural Machinery A Review. IEEE Access. – 2021. – 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135037>.
3. Götz K., Pointner M., Mayr L., Mailhammer S., Lienkamp M. Electrify the Field: Designing and Optimizing Electric Tractor Drivetrains with Real-World Cycles. World Electr. Veh. J. – 2025. – 16(463). <https://doi.org/10.3390/wevj16080463>
4. Wang B., Lv Y., Chu X., Wang D., Shang Sh. Design and Experimental Testing of Extended-Range Power Supply System for 15 Horsepower Electric Tractor. Agriculture. – 2024. – 14(1551). <https://doi.org/10.3390/agriculture14091551>.
5. Baek S.M., Jeon H.H., Kim W.S. et al. Design and analysis of a power transmission system for 55 kW electric tractor using agricultural workload data. Sci Rep. – 2025. – 15(28028). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11444-6>
6. Mao Y., Wu Y., Yan X., Liu M., Xu L. Simulation and experimental research of electric tractor drive system based on Modelica. PLoS ONE. – 2025. – 17(11): e0276231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276231>
7. Mahmoud M., Mossa M., Dousoky G. Dynamic Performance Analysis of An Electric Vehicle System Using Different Control Algorithms. Journal of Advanced Engineering Trends. – 2024. – 43. <https://doi.org/10.21608/JAET.2022.138420.1202>.
8. Xu W.X., Zhu Y.J., Zhang Y.G., Xiao M.H., Xu L.Y., Wei W.B., et al. Multi-objective optimization design of the transmission system parameters of a dual-motor-driven electric tractor based on improved deep deterministic policy gradient algorithm. Int J Agric & Biol Eng. – 2025. – 18(2). – p. 100–114.
9. Даниленко В. Д. Аналіз розвитку трансмісійних установок сучасних колісних тракторів / А. П. Кожушко, В. Д. Даниленко, С. Г. Селевич // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 2. – С. 118-131. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.13>
10. Трембач О.С., Кожушко А.П., Пелипенко Є.С., Мамонтов А.Г., Барабаш Г.І. Рационалізація конструкції безступінчастої трансмісії за критерієм продуктивності. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – № 1. – С. 108 – 115. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2024.1.13>
11. Kozhushko, A., Pelypenko, Y., Mittsel, M., Veretennikov, I., Kalnaguz, A., Trembach, O., Stanciu, A. Analysing the response of a dual-flow transmission (HMCVT) for wheeled tractors according to efficiency and productivity criteria. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. – 2024. – 16. – pp. 33–41. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue16.4>
12. Zhang, K.; Lu, Z.X.; Wang, L.; Deng, X.T.; Zhang, B.Q.; Sun, X.X. ECVT Configuration Design and Energy-saving Control of Hybrid Tractor Based on Lever Topology Method. Trans. Chin. Soc. Agric. Mach. 2024, Vol. 55, Iss. 12, p. 505-518. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2024.12.048>
13. Chen, H., Chen, X.A. Recirculation of Parallel-Connected Planetary Gear Trains. Chin. J. Mech. Eng. 2022. – 35(27). <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00703-6>

References (transliterated):

1. Pan Y., Zhong K., Xie Y., Pan M., Guan W., Li L., Liu C., Man X., Zhang Z., Li M. A Review of Hybrid Vehicles Classification and Their Energy Management Strategies: An Exploration of the Advantages of Genetic Algorithms. Algorithms. – 2025. – Vol. 18(354).
2. Scolaro E., Beligoj M., Perez Estevez M., Alberti L., Renzi M., Mattetti M. (2021). Electrification of Agricultural Machinery A Review. IEEE Access. – 2021. – 1-1.
3. Götz K., Pointner M., Mayr L., Mailhammer S., Lienkamp M. Electrify the Field: Designing and Optimizing Electric Tractor Drivetrains with Real-World Cycles. World Electr. Veh. J. – 2025. – 16(463).
4. Wang B., Lv Y., Chu X., Wang D., Shang Sh. Design and Experimental Testing of Extended-Range Power Supply System for 15 Horsepower Electric Tractor. Agriculture. – 2024. – 14(1551).
5. Baek S.M., Jeon H.H., Kim W.S. et al. Design and analysis of a power transmission system for 55 kW electric tractor using agricultural workload data. Sci Rep. – 2025. – 15(28028).

6. Mao Y., Wu Y., Yan X., Liu M., Xu L. Simulation and experimental research of electric tractor drive system based on Modelica. PLoS ONE. – 2025. – 17(11): e0276231.
7. Mahmoud M., Mossa M., Dousoky G. Dynamic Performance Analysis of An Electric Vehicle System Using Different Control Algorithms. Journal of Advanced Engineering Trends. – 2024. – 43.
8. Xu W.X., Zhu Y.J., Zhang Y.G., Xiao M.H., Xu L.Y., Wei W.B., et al. Multi-objective optimization design of the transmission system parameters of a dual-motor-driven electric tractor based on improved deep deterministic policy gradient algorithm. Int J Agric & Biol Eng. – 2025. – 18(2). – p. 100–114.
9. Kozhushko A.P., Danylenko V.D., Selevych S.H. Analiz rozvytku transmissiinykh ustanovok suchasnykh kolisnykh traktoriv [Analysis in development of transmissions for modern wheeled tractors]. Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor building]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2022. no 2. pp. 118 – 131.
10. Trembach O.S., Kozhushko A.P., Pelypenko Ye.S., Mamontov A.H., Barabash H.I. Ratsionalizatsiia konstruktсии bezstupinchastoi transmissii za kryteriiem produktyvnosti [Rationalisation of continuously variable transmission design based on productivity criteria]. Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor building]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2024. no 1. pp. 108 – 115
11. Kozhushko, A., Pelypenko, Y., Mittsel, M., Veretennikov, I., Kalnaguz, A., Trembach, O., Stanciu, A. Analysing the response of a dual-flow transmission (HMCVT) for wheeled tractors according to efficiency and productivity criteria. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. – 2024. – 16. – pp. 33–41. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue16.4>
12. Zhang, K.; Lu, Z.X.; Wang, L.; Deng, X.T.; Zhang, B.Q.; Sun, X.X. ECVT Configuration Design and Energy-saving Control of Hybrid Tractor Based on Lever Topology Method. Trans. Chin. Soc. Agric. Mach. 2024, Vol. 55, Iss. 12, p. 505-518. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2024.12.048>
13. Chen, H., Chen, X.A. Recirculation of Parallel-Connected Planetary Gear Trains. Chin. J. Mech. Eng. 2022. – 35(27).

Надійшла (received): 30.11.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Кожушко Андрій Павлович (Kozhushko Andrii) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-5911>; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com

Пелипенко Євген Сергійович (Pelypenko Yevhen) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8988-791X>; e-mail: pelipenkoeugene@gmail.com

Даниленко Віталій Дмитрович (Danylenko Vitalii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2787-3947>; e-mail: vitalii.ddanylenko@gmail.com

Саркісов Сергій Сергійович (Sarkisov Serhii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5223-1627>; e-mail: william.nellion@gmail.com