

Р. М. ІГНАТЮК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-1004-1469

О. С. СТАДНИК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0001-5881-2413

О. П. РИЖИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-8592-1217

Л. С. СЕРІЛКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри теоретичної механіки,
інженерної графіки та машинознавства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-2396-561X

В. Л. ПАХАРЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-9066-3806

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОМАСОВОГО МАХОВИКА В ТРАНСМІСІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Представлено результати комплексного дослідження доцільності застосування двомасового маховика в трансмісії електромобіля з урахуванням специфіки роботи електричного привода, характеристик силової установки та динамічних навантажень. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання електродвигунів, зменшення динамічних навантажень на трансмісію та покращення експлуатаційних характеристик транспортних засобів із електричними приводами. У роботі проаналізовано основні проблеми, пов'язані з роботою трансмісії електромобілів, та показано, що традиційні рішення з використанням жорстких з'єднань між електродвигуном і механічними елементами трансмісії можуть призводити до високочастотних коливань, що впливають на надійність і ресурс вузлів.

Основною метою дослідження є оцінка можливості та обґрунтування доцільності використання двомасового маховика для пом'якшення крутильних коливань, зниження пульсацій крутного моменту та підвищення загальної ефективності роботи трансмісії. Для цього проведено математичне моделювання динамічної взаємодії електродвигуна, двомасового маховика та навантаження в режимах прискорення та рекупративного гальмування. Результати чисельного моделювання дозволили встановити закономірності впливу параметрів двомасового маховика на характеристики трансмісії, визначити оптимальні співвідношення мас та жорсткостей елементів маховика для забезпечення мінімізації коливань та оцінити потенційні вигоди його застосування.



Аналіз отриманих результатів показав, що використання двомасового маховика може забезпечити суттєве зменшення амплітуд крутильних коливань, зниження механічних навантажень на вузли трансмісії та підвищення комфорту руху електромобіля. Однак доцільність впровадження такої системи залежить від конкретних робочих умов, конструктивних обмежень, масогабаритних характеристик та економічної доцільності. Узагальнені висновки свідчать про наявність потенціалу для подальшого експериментального та прикладного дослідження, що може стати основою для оптимізації трансмісій сучасних електромобілів.

Ключові слова: двомасовий маховик, електромобіль, трансмісія, крутильні коливання, математичне моделювання.

R. M. IHNATIUK

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-1004-1469

O. S. STADNYK

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0001-5881-2413

O. P. RYZHYI

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-8592-1217

L. S. SERILKO

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics,
Engineering Graphics and Machine Science
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-2396-561X

V. L. PAKHARENKO

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-4506-0096

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF APPLYING A DUAL-MASS FLYWHEEL IN AN ELECTRIC VEHICLE TRANSMISSION

The paper presents the results of a comprehensive study on the feasibility of applying a dual-mass flywheel in an electric vehicle transmission, taking into account the specific operating characteristics of the electric drive, the powertrain parameters, and dynamic loading conditions. The relevance of the study is driven by the need to improve the efficiency of electric motor utilization, reduce dynamic loads acting on transmission components, and enhance the operational performance of vehicles equipped with electric drivetrains. The main issues associated with the operation of electric vehicle transmissions are analyzed, and it is shown that conventional solutions based on rigid mechanical connections between the electric motor and transmission elements may lead to high-frequency torsional vibrations, which adversely affect the reliability and service life of mechanical components.

The primary objective of this research is to assess the applicability and substantiate the feasibility of using a dual-mass flywheel to mitigate torsional vibrations, reduce torque pulsations, and improve the overall efficiency of transmission operation. To achieve this goal, mathematical modeling of the dynamic interaction between the electric motor, the dual-mass flywheel, and the load was carried out under acceleration and regenerative braking modes. The results of numerical simulations made it possible to identify the influence patterns of dual-mass flywheel parameters

on transmission performance, determine optimal mass and stiffness ratios of the flywheel elements to minimize vibration levels, and evaluate the potential benefits of its implementation.

The analysis of the obtained results demonstrates that the use of a dual-mass flywheel can provide a significant reduction in torsional vibration amplitudes, decrease mechanical loads on transmission components, and improve driving comfort in electric vehicles. However, the feasibility of implementing such a system depends on specific operating conditions, design constraints, mass-and-size limitations, and economic considerations. The generalized conclusions indicate the existence of substantial potential for further experimental and applied research, which may serve as a basis for optimizing the transmissions of modern electric vehicles.

Key words: dual-mass flywheel, electric vehicle, transmission, torsional vibrations, mathematical modeling.

Постановка проблеми

Розвиток автомобільної техніки протягом понад століття супроводжується безперервним удосконаленням силових установок і трансмісій з метою підвищення надійності, комфорту, енергоефективності та зниження шкідливого впливу на довкілля. Історичний аналіз еволюції приводів і зчеплень свідчить, що ключовою проблемою механічних систем завжди залишалися коливальні процеси, нерівномірність передачі крутного моменту та динамічні навантаження, які негативно впливають на довговічність агрегатів і плавність руху транспортного засобу.

На ранніх етапах розвитку автомобілів парові та електричні приводи мали суттєву перевагу завдяки майже рівномірній характеристиці крутного моменту, що дозволяло обходитися без складних механізмів зчеплення та трансмісії. Водночас двигуни внутрішнього згорання, через специфічний характер роботи, вимагали застосування зчеплення та додаткових елементів для компенсації нерівномірності обертання і забезпечення прийняттого рівня комфорту. Зі зростанням потужності двигунів і ускладненням трансмісій це призвело до появи нових конструктивних рішень, серед яких важливе місце посіли демпфувальні маховики.

Незважаючи на те, що електродвигуни сучасних електромобілів забезпечують високий пусковий крутний момент і значно рівномірнішу роботу порівняно з ДВЗ, проблема крутильних коливань не втратила своєї актуальності. Дослідження показують, що імпульсний характер електромагнітного моменту, робота сигової електроніки, а також режими рекуперативного гальмування призводять до виникнення динамічних навантажень у трансмісії електромобіля. Ці коливання передаються на редуктор, вали та підвіску, що може спричинити підвищений рівень шуму, вібрації і зниження ресурсу механічних компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі, присвяченій дослідженню демпфувальних властивостей двомасового маховика (ДММ) методом моделювання та мультирежимних чисельних випробувань, показано, що правильно налаштований ДММ здатен знижувати амплітуди крутильних коливань у широкому спектрі робочих режимів і підвищувати характеристики трансмісії [1]. Робота автора [2] показує, що двоінерційні маховикові системи можуть не лише гасити високочастотні пульсації, а й слугувати проміжним буфером потужності для зменшення пікових навантажень на батарею під час прискорень та рекуперації. Це відкриває додаткову перспективу поєднання демпфування та енергетичного накопичення в електромобільних силових установках. У дослідженні з оптимізації параметрів двомасового маховика показано методи багатокритеріальної оптимізації. Автори [3] доводять, що впровадження оптимізованих демпферів (наприклад, з додатковими поглиначами чи регульованою жорсткістю) дозволяє суттєво поліпшити ізоляцію коливань без значного збільшення маси системи.

Практичний аналіз впливу інтенсивності прискорення на елементи двомасового маховика та навантаження трансмісії демонструє, що режими сильного прискорення зростають пікові навантаження на пружні елементи ДММ і потребують їх підсилення або оптимізації конфігурації. Робота авторів [4] дає рекомендації з підбору параметрів для реальних автомобільних сценаріїв. Роботи [5, 6] з моделювання та аналізу динаміки двомасових маховиків систематизують підходи до математичного опису ДММ, включаючи нелінійні характеристики пружин-демпферів і вплив електроніки привода на пульсації моменту. Ці дослідження підкреслюють необхідність адаптації класичних ДММ-рішень під специфіку електродвигунів

Публікація [7] з активного управління крутильними коливаннями показує, що при наявності високопродуктивних алгоритмів керування моментом електродвигуна можна частково компенсувати потребу у великих механічних демпферних пристроях, однак в багатоступінчастих трансмісіях поєднання активного контролю та механічного ДММ дає найкращий компроміс між масою, вартістю і показниками акустично-вібраційного контролю електромобіля.

Індустріальні документи та технічні прес-релізи виробників трансмісій [8] констатують, що ДММ залишається одним із найефективніших механічних рішень для ізоляції крутильних коливань у трансмісіях різного ступеня складності, але при цьому підкреслюють питання сумісності з електричними приводами та масо-габаритні обмеження.

У науковій роботі [9] зазначається, що застосування двомасових маховиків дозволяє ефективно зменшити амплітуду крутильних коливань, ізолювати трансмісію від імпульсних навантажень та підвищити акустичний комфорт транспортного засобу. Для електромобілів це особливо важливо, оскільки відсутність шуму двигуна

внутрішнього згоряння робить вібрації трансмісії більш помітними для водія та пасажирів. Крім того, зменшення динамічних навантажень сприяє підвищенню довговічності редуктора та елементів приводу коліс, що є критичним з огляду на високий миттєвий крутний момент електродвигунів.

Актуальність дослідження та впровадження двомасових маховиків у конструкцію сучасних електромобілів підтверджується також сучасними тенденціями розвитку електричного транспорту, орієнтованими на підвищення енергоефективності, зниження маси та покращення експлуатаційних показників. У роботі [10] підкреслюється, що оптимізовані демпфувальні системи в електроприводах дозволяють не лише знизити механічні втрати, а й підвищити плавність керування тяговим моментом, що позитивно впливає на загальну ефективність електромобіля.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є обґрунтування доцільності використання двомасового маховика у трансмісії сучасного електромобіля, а також дослідження його впливу на крутильні коливання, вібронавантаженість і експлуатаційні показники електроприводу з урахуванням специфіки роботи тягового електродвигуна та силової електроніки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Двомасовий маховик може бути застосований не в усіх архітектурах приводу електромобіля, оскільки його функція пов'язана з наявністю ме-ханічного ланцюга передачі крутного моменту та потребою демпфування крутильних коливань.

Стрімкий розвиток електромобільного транспорту зумовив суттєві зміни у підходах до проєктування силових установок і трансмісій. Тривалий час домінувала концепція електропривода з одноступінчастим редуктором, що пояснювалося високим пусковим крутним моментом електродвигуна та широким діапазоном його ефективної роботи. Проте зростання вимог до динамічних характеристик, максимальної швидкості, енергоефективності та акустичного комфорту призвело до повернення інтересу до багатоступінчастих трансмісій у електромобілях.

У сучасних наукових і прикладних дослідженнях [11] дедалі частіше розглядаються дво-, три- та багатоступінчасті коробки передач для електричних силових установок, зокрема у поєднанні з двома зчепленнями або синхронізаторами. Типові архітектури таких приводів наведено на рис. 1, де показано одноступінчастий електропривод, а також дво-, три- та чотиріступінчасті трансмісії з різним рівнем конструктивної складності.

Наведені схеми не є суто теоретичними, вони реалізовані або випробувані на реальних серійних електромобілях та експериментальних прототипах.

Разом з ускладненням механічної частини електропривода актуалізується проблема крутильних коливань, ударних навантажень і шумів, які в умовах відсутності двигуна внутрішнього згоряння стають домінуючими чинниками комфорту та довговічності. Саме в цьому контексті доцільним є аналіз можливостей застосування двомасових маховиків – елементів, які традиційно використовуються в трансмісіях автомобілів з ДВЗ, але наразі розглядаються як перспективний засіб демпфування крутильних коливань в електромобілях.

Архітектура одноступінчастого електроприводу, показана на рис. 1, а, являє собою електропривід з одним редуктором, диференціалом та півосями. Така схема тривалий час вважалася оптимальною для електромобілів масового сегмента завдяки простоті, високій надійності та мінімальній кількості механічних вузлів. Саме цей підхід реалізований у більшості серійних електромобілів початкового та середнього класу (Tesla Model 3, Leaf та інші). Водночас обмеження одноступінчастого редуктора стають очевидними зі зростанням потужності електродвигуна та вимог до максимальної швидкості. Для забезпечення прийнятної динаміки на низьких швидкостях і високій ефективності на крейсерських режимах доводиться йти на компроміс у виборі передатного числа, що негативно впливає на загальний ККД силової установки.

З точки зору обертових коливань одноступінчастий привід є найбільш нейтральним, оскільки має мінімальну кількість валів і зубчастих пар. Саме тому застосування двомасових маховиків у таких системах практично не розглядається і вважається недоцільним.

На схемі рис. 1, б, наведена двоступінчастий електропривід з двома зчепленнями або керованим механізмом перемикання передач. Така архі-тектура вже знайшла практичне застосування у серійних електромобілях високого класу. Найбільш відомим прикладом є використання двоступінчастої коробки передач на задній осі у спортивних електромобілях преміум-сегмента (Porsche Taycan, Audi e-tron GT, Lucid Air).

Перша передача в такій системі забезпечує максимальний крутний момент на колесах під час рушання та інтенсивного розгону, тоді як друга передача оптимізована для руху з високою швидкістю і зниження втрат у редукторі. Результатом є покращення динаміки та підвищення енергоефективності в широкому діапазоні швидкостей.

Однак поява другої передачі принципово змінює динаміку трансмісії. Під час перемикання передач виникають короточасні розриви або стрибки крутного моменту, що призводить до збудження крутильних коливань у валах, зубчастих передачах і диференціалі. У класичних автомобілях з ДВЗ ці коливання частково маскуються шумом і вібраціями двигуна, тоді як в електромобілях вони стають значно більш помітними. Саме в таких архітектурах застосування двомасового маховика між електродвигуном і трансмісією є технічно обґрунтованим. Двомасовий маховик дозволяє відокремити інерцію ротора електродвигуна від інерції трансмісії, зменшити пікові навантаження під час перемикань передач і підвищити акустичний комфорт.

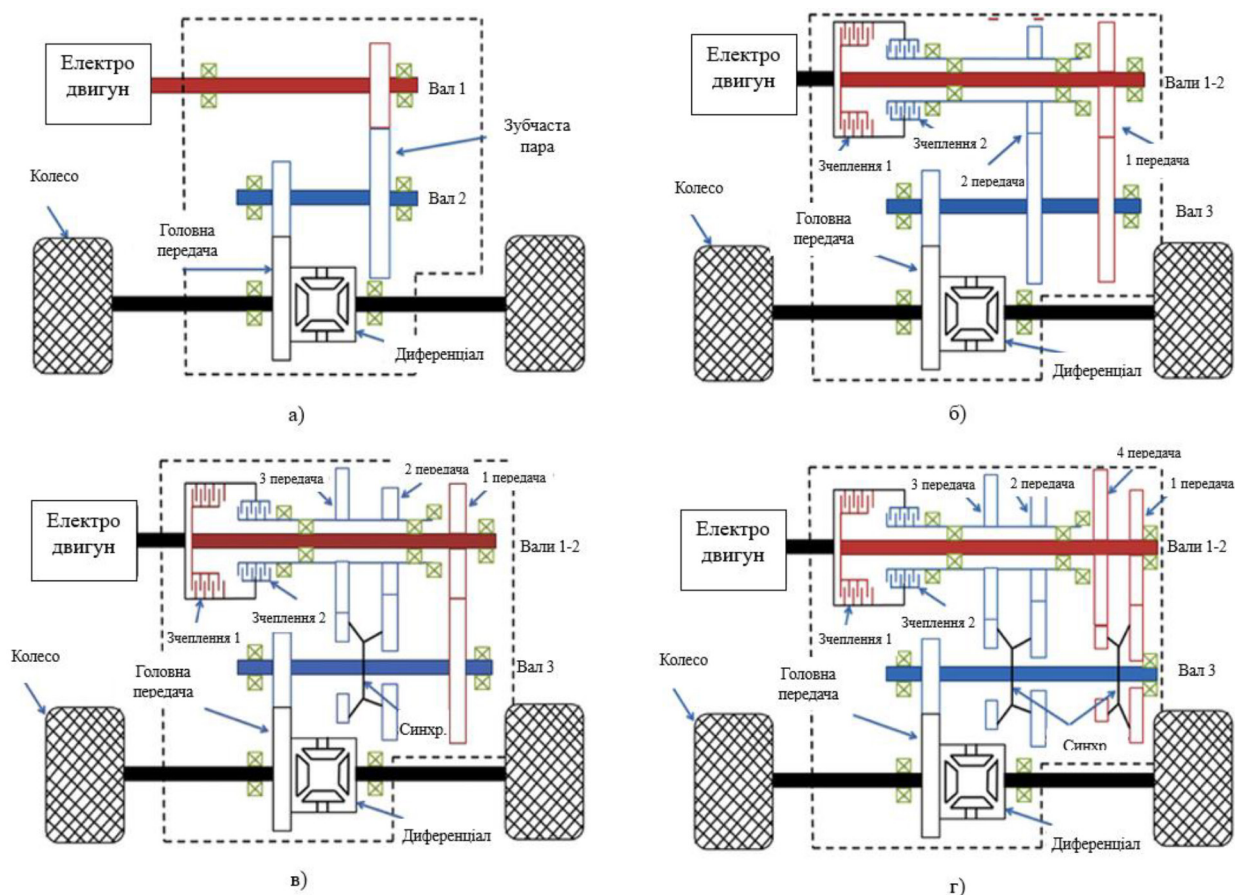


Рис. 1. Різновиди силової архітектури електромобіля [11]

Архітектура, показана на рис. 1, в, являє собою триступінчасту трансмісію з синхронізатором та двома зчепленнями. Подібні рішення застосовувалися або випробовувалися у високопродуктивних електромобілях і експериментальних прототипах, орієнтованих на досягнення максимальних динамічних характеристик.

Збільшення кількості передач дозволяє ще точніше підтримувати роботу електродвигуна в зоні максимального ККД, однак одночасно призводить до різкого зростання механічної складності привода. Кількість валів, зубчастих пар і зчеплень зростає, що неминує підвищує рівень крутильних коливань і динамічних навантажень.

У таких системах без ефективного демпфування коливань значно знижується ресурс трансмісії, ускладнюється керування перемиканнями передач і погіршується комфорт руху. Саме тому триступінчасті електроприводи є одними з найбільш перспективних кандидатів для інтеграції двомасових маховиків, які можуть виконувати роль механічного фільтра високочастотних і низькочастотних коливань.

Схема на рис. 1, г, демонструє чотириступінчасту трансмісію з синхронізатором, яка наразі розглядається переважно в дослідних розробках і прототипах (розробки та прототипи ZF, Magna, Stellantis). Подібні рішення пропонуються для електричних спортивних автомобілів, важких електромобілів та комерційного транспорту. У таких архітектурах динамічні навантаження набувають особливої гостроти. Часті перемикання передач, високі миттєві крутні моменти електродвигунів і режими рекуперативного гальмування створюють складний спектр крутильних збурень. Без застосування спеціальних демпфувальних елементів забезпечити прийнятний рівень надійності та комфорту практично неможливо.

Двомасовий маховик у багаступінчастому електроприводі може розглядатися як ключовий елемент, що забезпечує узгодження електричної та механічної частин силової установки.

Відповідно до архітектур багаступінчастих електроприводів (рис. 1, б-г), двомасовий маховик доцільно встановлювати між електричним двигуном та вхідним валом трансмісії, рис. 2.

У роботі розглядається електромобіль з централізованим електричним двигуном та двоступінчастою механічною трансмісією, аналогічною тій, що застосовується в сучасних високопродуктивних електромобілях (типу Porsche Taycan або Audi RS e-tron GT).

У даних серійних електромобілях двомасовий маховик у класичному розумінні не застосовується. Демпфування крутильних коливань у цих силових установках реалізовано за рахунок оптимізованої конструкції редуктора, пружних елементів трансмісії та керування електромагнітним моментом електродвигуна. Водночас наявність

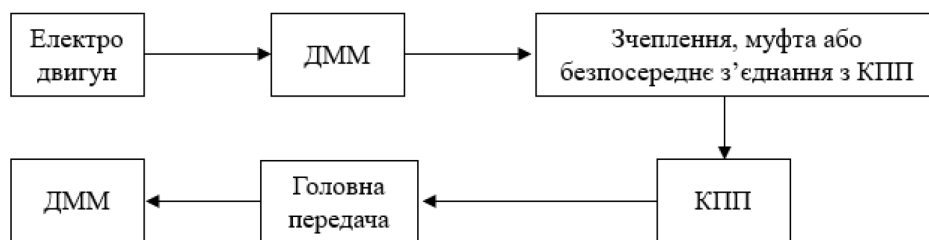


Рис. 2. Схема розміщення ДММ в трансмісії електромобіля

двоступінчастої коробки передач і високих миттєвих крутних моментів створює передумови для виникнення значних динамічних навантажень, що обґрунтовує доцільність дослідження альтернативних або додаткових механічних демпфувальних рішень, зокрема двомасового маховика, у перспективних електроприводах.

З метою зменшення крутильних коливань і динамічних навантажень у трансмісії між електричним двигуном і коробкою передач нами пропонується встановити двомасовий маховик, рис. 2.

У запропонованій моделі двомасовий маховик встановлюється між електричним двигуном та двоступінчастою коробкою передач, що дозволяє демпфувати крутильні коливання, які виникають:

- під час перемикання передач;
- при різких змінах електромагнітного моменту;
- у режимах рекуперативного гальмування.

Аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню крутильних коливань у трансмісіях з двомасовим маховиком, свідчить, що переважна більшість робіт базується на багатомасових динамічних моделях, побудованих на основі другого закону Ньютона. Зокрема, у роботі, присвяченій аналізу процесів коливань у трансмісії автомобіля під час рушання з місця, використано шестиступеневу крутильну модель, яка включає двигун внутрішнього згорання, дві маси двомасового маховика, зчеплення, зубчасту пару коробки передач і приведену масу автомобіля [4].

Аналогічний математичний каркас використано і в роботі [5], де досліджуються демпфувальні властивості двомасового маховика в різних режимах руху транспортного засобу. Автори застосували шестиступеневу модель трансмісії з урахуванням нелінійних характеристик пружних і демпфувальних елементів ДММ, а також розглянули кілька експлуатаційних сценаріїв, включаючи пуск, розгін і зміну навантаження.

Спільною рисою зазначених робіт є використання однакової структурної схеми математичної моделі, у якій кожен елемент трансмісії представлений у вигляді зосередженої інерційної маси, а взаємодія між ними описується пружно-демпфувальними зв'язками. Рівняння руху формулюються через різниці кутових переміщень і швидкостей, що дозволяє адекватно описати крутильні коливання та динамічні навантаження в трансмісії. Водночас відмінності між цими дослідженнями полягають у постановці задачі та глибині врахування нелінійних ефектів: у роботі [4] основний акцент зроблено на аналізі перехідного процесу рушання, тоді як у [5] – на оцінці демпфувальних властивостей двомасового маховика за різних умов експлуатації.

Водночас слід зазначити, що більшість наведених досліджень орієнтовані на трансмісії автомобілів з двигунами внутрішнього згорання або гібридні конфігурації, у яких зчеплення є конструктивно необхідним елементом. Для електромобілів така постановка задачі не завжди є виправданою, оскільки електричний двигун забезпечує керований пуск без розриву силового потоку, а потреба у зчепленні відсутня або суттєво зменшена. У цьому випадку включення зчеплення до математичної моделі призводить до ускладнення системи рівнянь без істотного впливу на результати аналізу крутильних коливань.

З огляду на викладене, актуальним є застосування п'ятиступеневої моделі трансмісії для електромобілів, у якій виключено зчеплення як елемент, не притаманний електричному приводу. Така модель є логічною адаптацією класичних підходів, широко застосовуваних у дослідженнях двомасових маховиків, і водночас краще відповідає конструктивним та експлуатаційним особливостям електромобілів. Використання п'ятиступеневої моделі дозволяє зосередитись на ключових фізичних процесах – взаємодії електричного двигуна, двомасового маховика та трансмісії, і створює методично обґрунтовану основу для подальших досліджень доцільності застосування ДММ у сучасних електромобілях.

Рівняння для електричного двигуна та первинної маси ДММ матиме вигляд:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = T_e - k_1 (\theta_1 - \theta_2) - c_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2), \quad (1)$$

де $T_1(t)$ – електромагнітний крутний момент електричного двигуна; J_1 – момент інерції електричного двигуна та первинної маси ДММ; θ_1 – кутове переміщення ротора електричного двигуна разом із первинною масою ДММ; θ_2 – кутове переміщення вторинної маси ДММ; k_1 – крутильна жорсткість ДММ; c_1 – коефіцієнт демпфування ДММ.

Дане рівняння описує баланс моментів на роторі електродвигуна, який безпосередньо з'єднаний з первинною масою ДММ.

Наступне рівняння відповідає підходу автора [5], але без урахування зчеплення, що відповідає специфіці електромобіля. Вторинна маса ДММ описується наступною формулою:

$$J_2 \ddot{\theta}_2 = k_1 (\theta_1 - \theta_2) + c_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - k_2 (\theta_2 - \theta_3) - c_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3), \quad (2)$$

де J_2 – момент інерції вторинної маси ДММ; θ_3 – кутове переміщення вхідного вала КПП; k_2 – крутильна жорсткість вхідного вала КПП; c_2 – коефіцієнт демпфування вхідного вала.

Рівняння 3 описує крутильну динаміку проміжного вузла між ДММ і вихідним валом трансмісії, тобто як вхідний вал КПП реагує на момент від ДММ і передає його далі.

$$J_3 \ddot{\theta}_3 = k_2 (\theta_2 - \theta_3) + c_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) - k_3 (\theta_3 - \theta_4) - c_3 (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4), \quad (3)$$

де J_3 – момент інерції вхідного вала КПП; θ_4 – кутове переміщення вихідного вала трансмісії та диференціала; k_3 – крутильна жорсткість коробки передач; c_3 – коефіцієнт демпфування КПП.

Наступне рівняння описує динаміку крутильного руху диференціала, який з'єднує коробку передач із колесами.

$$J_4 \ddot{\theta}_4 = k_3 (\theta_3 - \theta_4) + c_3 (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) - k_4 (\theta_4 - \theta_5) - c_4 (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5), \quad (4)$$

де J_4 – момент інерції вихідного вала та диференціала; θ_5 – приведені кутові переміщення коліс і маси електромобіля; k_4 – крутильна жорсткість приводу коліс; c_4 – коефіцієнт демпфування приводу коліс.

Рівняння 5 описує крутильну динаміку приводу коліс та реакцію маси електромобіля на переданий крутний момент.

$$J_5 \ddot{\theta}_5 = k_4 (\theta_4 - \theta_5) + c_4 (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5) - C_x \theta_5, \quad (5)$$

де J_5 – приведений момент інерції електромобіля; C_x – приведений коефіцієнт опору руху електромобіля, що враховує опір коченню та аеродинамічний опір.

За аналогією до багаторежимного підходу, використаного в роботі [5], електричний двигун у даній роботі розглядається як кероване джерело крутного моменту. В математичній моделі двигун задає крутний момент безпосередньо на вал трансмісії відповідно до заданого закону керування, без детального моделювання його електричної частини. Такий підхід дозволяє досліджувати вплив змінного крутного моменту на крутильні коливання трансмісії та ефективність двомасового маховика в різних режимах руху електромобіля.

$$T_e(t) = T_k(t) + \Delta T(t), \quad (6)$$

де $T_k(t)$ – заданий момент керування; $\Delta T(t)$ – пульсації моменту, зумовлені інвертором та електромагнітними гармоніками.

Запропонована п'яти ступенева модель є логічною адаптацією моделі з роботи [4, 5] та зберігає її ключові переваги, зокрема можливість багаторежимного моделювання. Одночасно вона узгоджується з підходом аналізу перехідних процесів, застосованим у роботі [2], і краще відповідає конструктивним особливостям електромобілів.

Висновки

Проведений аналіз конструктивних схем електромобільних силових установок показав, що застосування двомасового маховика є доцільним не для всіх архітектур електропривода. В одноступінчастих трансмісіях, які мають мінімальну кількість механічних ланок і порівняно низький рівень крутильних збурень, використання двомасового маховика є технічно та економічно недоцільним.

Встановлено, що у багаступінчастих електричних трансмісіях (двоступінчастих і більше), особливо в системах з високими миттєвими крутними моментами та режимами частих перемикань передач, виникають значні крутильні коливання і пікові динамічні навантаження, які негативно впливають на довговічність елементів трансмісії та акустичний комфорт електромобіля. Саме для таких архітектур застосування двомасового маховика є конструктивно обґрунтованим.

Розроблена п'ятиступенева математична модель трансмісії електромобіля з двомасовим маховиком, адаптована до специфіки електричного приводу шляхом виключення зчеплення, дозволяє адекватно описувати крутильні коливання та динамічні навантаження в характерних експлуатаційних режимах, зокрема під час рушання з місця, інтенсивного розгону та рекуперативного гальмування.

Результати чисельного моделювання підтверджують, що введення двомасового маховика між електродвигуном і коробкою передач сприяє зменшенню амплітуд крутильних коливань, зниженню пікових навантажень у валах і зубчастих передачах, а також покращенню акустично-вібраційних показників трансмісії. Це створює передумови для підвищення ресурсу механічних вузлів та стабільності роботи електропривода.

Водночас встановлено, що доцільність застосування двомасового маховика в електромобілях суттєво залежить від конструктивних і експлуатаційних чинників, зокрема масо-габаритних обмежень, параметрів силової

електроніки, алгоритмів керування електромагнітним моментом та економічної ефективності впровадження. За відсутності оптимізації цих факторів механічне демпфування може бути частково або повністю замінене активними методами керування моментом.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що застосування двомасового маховика в трансмісіях електромобілів є доцільним переважно для високопродуктивних багатоступінчастих електроприводів, де вимоги до динаміки, комфорту та довговічності перевищують обмеження, пов'язані зі збільшенням маси та конструктивної складності. Отримані результати можуть бути використані як методична основа для подальших експериментальних досліджень та оптимізації перспективних електромобільних трансмісій.

Список використаної літератури

1. L. Chen, W. Shi, Z. Chen. Research on damping performance of dual mass flywheel based on vehicle transmission system modeling and multi-condition simulation. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 28064-28077. <https://doi.org/10.3390/app12157439>
2. A. Mehraban. Dual-inertia flywheel energy storage system for electric vehicles. *IET Electric Power Applications*. 2024. Vol. 18. Is. 10. P. 1370-1381 <https://doi.org/10.1049/elp2.12485>
3. H. J. Lee, J. K. Shim, Multi-objective optimization of a dual mass flywheel with centrifugal pendulum vibration absorbers in a single-shaft parallel hybrid electric vehicle powertrain for torsional vibration reduction. *Mechanical systems and signal processing*. 2022. Vol. 163, P. 108-152 <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108152>
4. B. Kindratsky, R. Litvin, O. Osmak, Influence of vehicle acceleration intensity on dual-mass flywheel elements and transmission load. *Transport technologies*. 2022 Vol. 3. № 1. P. 65–76 <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.065>
5. L. Chen, W. Shi, Z. Chen. Modeling and experimental study on dynamic characteristics of dual-mass flywheel torsional damper. *Shock and vibration*. 2019. Vol. 2019, 13 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/5808279>
6. H. Niu, L. Zeng, C. Wei, Z. Wan. Electromagnetic field and variable inertia analysis of a dual mass flywheel based on electromagnetic control. *Symmetry*. 2024. Vol. 16. № 9, 18 pages. <https://doi.org/10.3390/sym16091234>
7. S. Chen, M. Hu, Active torsional vibration suppression of integrated electric drive system based on optimal harmonic current instruction analytic calculation method. Available at SSRN. 2024. 20 pages <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4155241>
8. ZF Friedrichshafen AG. Dual-mass flywheel solutions for advanced vehicle drivetrains. ZF Press Release, 2022. Available at: <https://www.zf.com> (accessed: 2022).
9. H. Heisler. Advanced vehicle technology. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002. ISBN: 978-0750651318 <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3>
10. K. Horváth, A. Zelei. Simulating noise, vibration, and harshness advances in electric vehicle powertrains: strategies and challenges. *World electric vehicle journal*. 2024. Vol. 15. № 8, 367 p <https://doi.org/10.3390/wevj15080367>
11. J. Ruan, P. Walker, J. Wu, N. Zhang, B. Zhang. Development of continuously variable transmission and multi-speed dualclutch transmission for pure electric vehicle. *Advances in mechanical engineering* 2018. Vol. 10(2) P. 1–15 <https://doi.org/10.1177/1687814018758223>

References

1. Chen, L., Shi, W., Chen, Z. (2020). Research on damping performance of dual mass flywheel based on vehicle transmission system modeling and multi-condition simulation. *IEEE Access*, 8, 28064–28077. <https://doi.org/10.3390/app12157439>
2. Mehraban A. (2024). Dual-inertia flywheel energy storage system for electric vehicles. *Energy Storage* 6 (1). <https://doi.org/10.1049/elp2.12485>
3. Lee H. J., Shim J. K. (2022). Multi-objective optimization of a dual mass flywheel with centrifugal pendulum vibration absorbers in a single-shaft parallel hybrid electric vehicle powertrain for torsional vibration reduction. *Mechanical Systems and Signal Processing* 163, 108-152 <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108152>
4. Kindratsky B., Litvin R., Osmak O. (2022). Influence of vehicle acceleration intensity on dual-mass flywheel elements and transmission load. *Transport Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 65–76, 2022, <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.065>
5. L. Chen, W. Shi, Z. Chen. Modeling and experimental study on dynamic characteristics of dual-mass flywheel torsional damper. *Shock and vibration*, vol. 2019, Article ID 5808279, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5808279>
6. H. Niu, L. Zeng, C. Wei, Z. Wan. electromagnetic field and variable inertia analysis of a dual mass flywheel based on electromagnetic control. *Symmetry*, vol. 16, № 9, 1234, 2024. <https://doi.org/10.3390/sym16091234>
7. Chen S., Hu M. (2022). Active torsional vibration suppression of integrated electric drive system based on optimal harmonic current instruction analytic calculation method. *SSRN* <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4155241>
8. ZF Friedrichshafen AG. Dual-mass flywheel solutions for advanced vehicle drivetrains. ZF Press Release. Available at: <https://www.zf.com> (accessed: 2022).

9. Heisler H. (2002) *Advanced vehicle technology*. Butterworth-Heinemann, *Oxford*. ISBN: 978-0750651318. pp. 654 <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3>

10. Horváth K., Zelei A. (2024). Simulating noise, vibration, and harshness advances in electric vehicle powertrains: strategies and challenges. *World Electric Vehicle Journal*, 15(8), p.367. <https://doi.org/10.3390/wevj15080367>

11. Ruan Jiageng, Walker Paul D, Wu Jinglai, Zhang Nong and Zhang Bangji. (2018) Development of continuously variable transmission and multi-speed dualclutch transmission for pure electric vehicle. *Advances In Mechanical Engineering* 10(2) 1–15 <https://doi.org/10.1177/1687814018758223>

Дата першого надходження статті до видання: 08.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026