

О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО

ОСНОВНИ ТЕНДЕНЦІЇ ТА НАПРЯМИ В ОПТИМАЛЬНОМУ ПРОЕКТУВАННІ ТРАНСМІСІЙ КОЛІСНИХ МАШИН (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)

Сучасні вимоги до процесу проектування будь-якого технічного об'єкту є дуже жорсткими. Спрямованість та незалежність, скорочення часу на процес, максимальна автоматизація процесу, комплексність – все це є невід'ємними характеристиками сучасного проектування. Тому досить широко розповсюджені підходи до оптимального проектування технічних систем. Для технічних об'єктів доцільно вживати термін оптимально-раціонального проектування. У даній роботі розглянуті механічні ступінчасті трансмісії. Слід зауважити, що механічні ступінчасті трансмісії є одним із найрозповсюджених видів і охоплюють всі класи машин, від легкових, через вантажні автомобілі, до військових машин та техніки спеціального призначення. Ця розповсюдженість призвела до великого ряду компоновальних схем та різної агрегато-насиченості. Вказані аспекти змусили інженерів до формулювання ряду специфічних вимог щодо механічних ступінчастих трансмісій, які вилилися у певні якісні характеристики – критерії, та застосування різних концепцій, методик та підходів до проектування. Для авторів є цікавими саме механічні ступінчасті трансмісії колісних машин, як розповсюджений сегмент транспортної техніки. Таким чином, освітлення методів, підходів та напрямків до оптимально-раціонального проектування механічних ступінчастих трансмісій колісних машин є актуальною задачею, яка дасть змогу виявити «білі плями» цього питання, визначити переваги та недоліки існуючих напрямів, допоможе обрати вектор подальшої наукової думки, визначитися з підходами та методами до оптимально-раціонального проектування механічних ступінчастих трансмісій колісних машин. Освітлено декілька загальних напрямів проектування механічних ступінчастих трансмісій колісних машин: вибір параметрів трансмісії, врахування динаміки крутильних коливань, раціональний розподіл крутильних моментів між ведучими колесами, розподіл потужностей у трансмісії, обрання раціональних фаз перемикання тощо. Описані основні об'єкти досліджень та розповсюджені методи розв'язання задач проектування. Надамо графічне подання викладеного матеріалу, що дає змогу швидко орієнтуватися у питанні, а при необхідності модифікувати існуючі чи синтезувати нові задачі.

Ключові слова: трансмісія, оптимальне проектування, напрями дослідження

А. В. БОНДАРЕНКО, А. В. УСТИНЕНКО

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ В ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСМИССИЙ КОЛЕСНЫХ МАШИН (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

Современные требования к процессу проектирования любого технического объекта очень жесткие. Направленность и независимость, сокращение времени на сам процесс, максимальная автоматизация процесса, комплексность – все это неотъемлемые характеристики современного проектирования. Поэтому достаточно широко распространены подходы к оптимальному проектированию технических систем. Для технических объектов целесообразно использовать термин оптимально-рационального проектирования. В данной работе рассмотрены механические ступенчатые трансмиссии. Следует заметить, что механические ступенчатые трансмиссии являются самым распространенным видом и охватывают все классы машин, от легковых, через грузовые автомобили, до военных машин и техники специального назначения. Эта распространенность привела к большому ряду компоновочных схем и разной агрегато-насыщенности. Указанные аспекты привели инженеров к формулированию ряда специфических требований к механическим ступенчатым трансмиссиям, которые вылились в определенные качественные характеристики – критерии и использованию различных концепций, методик и подходов к проектированию. Для авторов представляет интерес именно механические ступенчатые трансмиссии колесных машин, как распространенный сегмент транспортной техники. Таким образом, описание методов, подходов и направлений к оптимально-рациональному проектированию механических ступенчатых трансмиссий колесных машин является актуальной задачей, которая позволит выявить «белые пятна» этого вопроса, определить преимущества и недостатки существующих направлений и поможет выбрать вектор дальнейшей научной мысли и определиться с подходами и методами к оптимально-рациональному проектированию механических ступенчатых трансмиссий колесных машин. Освещены несколько общих направлений проектирования механических ступенчатых трансмиссий колесных машин: выбор параметров трансмиссии, учет динамики крутильных колебаний, рациональное распределение крутящих моментов между ведущими колесами, распределение мощностей в трансмиссии, выбор рациональных фаз переключения и т.д. Описаны основные объекты исследований и распространенные методы решения задач проектирования. Приведено графическое представление изложенного материала, позволяющее быстро ориентироваться в вопросе, а при необходимости – модифицировать существующие или синтезировать новые задачи

Ключевые слова: трансмиссия, оптимальное проектирование, направления исследования

О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО

MAIN TRENDS AND DIRECTIONS IN THE OPTIMAL DESIGN OF WHEEL MACHINE TRANSMISSIONS (REVIEW ARTICLE)

Modern requirements for the design process of any technical object are very strict. Focus and independence, reduction of time for the process itself, maximum automation of the process, complexity - all these are integral characteristics of modern design. Therefore, approaches to the optimal design of technical systems are quite widespread. For technical objects, it is advisable to use the term optimal-rational design. In this paper, mechanical step transmissions are considered. It should be noted that mechanical step transmissions is the most common type and covers all classes of vehicles, from light vehicles, through trucks, to military vehicles and special-purpose equipment. This prevalence has led to a wide range of layout schemes and different aggregate-saturation. These aspects led engineers to formulate a number of specific requirements for mechanical step transmissions, which resulted in certain quality characteristics - criteria and use various concepts, techniques and design approaches. For the authors, it is mechanical step transmissions of wheeled vehicles that is of interest, as the big segment of transport equipment. Thus, the description of methods, approaches and directions to the optimal-rational design mechanical step transmissions wheeled vehicles is an urgent task that will reveal the "blank spots" of this issue, determine the advantages and disadvantages of existing areas and help to choose a vector of further scientific thought and determine the approaches and methods to optimal-rational design mechanical step transmissions wheeled vehicles. Several general directions of mechanical step transmissions wheeled vehicles design are highlighted: the choice of transmission parameters, taking into account the dynamics of torsional vibrations, rational distribution of torque between the drive wheels, power distribution in the transmission, selection of rational shift phases, etc. The main objects of research and common methods for solving design problems are described. A graphical representation of the presented material is provided, which allows you to quickly navigate the issue, and, if necessary, modify existing or synthesize new tasks.

Keywords: transmission, optimal design, research directions

© О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, 2022

Вступ. Актуальність задачі. Сучасні вимоги до процесу проектування будь-якого технічного об'єкту є дуже жорсткими. Спрямованість та незалежність, пов'язаність теоретичних наукових досліджень і бажаного кінцевого продукту для їх практичної реалізації, скорочення часу на процес та його максимальна автоматизація, комплексність – все це є невід'ємними характеристиками сучасного проектування. Також завжди висувається необхідність пов'язання аспектів «конструкція – технологія – економіка».

Сам процес проектування передбачає виконання послідовності певних процедур для створення нових видів чи зразків технічного об'єкту. Під кожною процедурою маємо на увазі якийсь метод, тобто сукупність дій для досягнення бажаного результату.

Тенденцією сучасності є мінімізація суб'єктивного впливу людини на кожному з етапів проектування. Тому досить широко розповсюджені підходи, що базуються на оптимальному проектуванні технічних систем. Зазвичай, для технічних об'єктів, при фіксованому ефективному фізичному принципі дії, оптимізація полягає у пошуку та виборі найраціональнішого технічного рішення. Для цього варіюють конструктивними елементами та їхніми ознаками задля знаходження сприятливої комбінації; або, у випадку фіксованого технічного рішення – знаходження оптимальної комбінації співвідношення параметрів.

Але ряд числових і функціональних обмежень для технічних об'єктів, а також особливості того чи іншого методу розв'язання задачі не дають змоги досягти якнайкращих комбінацій та абсолютних значень параметрів проектування. Тому для технічних об'єктів доцільно вживати термін оптимально-раціонального проектування (ОРП). Звичайно, перевага віддається підходам до ОРП, де людині відведено місце лише у якості постановника задачі.

Одним із цікавих технічних об'єктів у машинобудуванні є трансмісії транспортних машин. З усього спектру, за способом передачі енергії та принципом дії, авторам більш цікаві саме механічні ступінчасті трансмісії (МСТ). Слід зауважити, що МСТ є одним із найрозповсюджених видів і охоплює всі класи машин, від легкових, через вантажні автомобілі, до військових машин та техніки спеціального призначення. Ця розповсюдженість призвела до великого ряду компоновальних схем та різної агрегато-насиченості. Вказані аспекти змусили інженерів сформулювати ряд специфічних вимог до МСТ, які вилилися у певні якісні характеристики – критерії, та використовувати різні концепції, методики та підходи до проектування.

Проектування МСТ з відносно складною та агрегато-насиченою компоновальною схемою є об'єктивною проблемою. Це пов'язано, насамперед, із великою кількістю параметрів проектування, яка може досягати 3–5 десятків. По-друге, ціла плеяда зовнішніх зв'язків з параметрами проектування та внутрішніх взаємозв'язків між ними формує складну систему числових та функціональних обмежень, які накладають на процес проектування певні труднощі.

І далі, сукупність певної кількості критеріїв, які можуть бути такі, що виключають один одного, так й ідеологічно пов'язані один з одним, спонукають проектувальника розставляти пріоритети або розв'язувати різнокритеріальні задачі з подальшим аналізом, або шукати інші шляхи «боротьби» з багатокритеріальністю.

Зважаючи на вказані вище положення, доцільність використання ОРП при проектуванні МСТ є незаперечною. Але широкий спектр методів та підходів до процесу ОРП може спричинити розгубленість проектувальника при розв'язанні задачі. Також зазначимо, що не кожен з методів може бути зручно адаптований для розв'язання задачі ОРП МСТ. Для авторів є цікавими саме МСТ колісних машин, як найбільший сегмент транспортної техніки.

Таким чином, освітлення методів, підходів та напрямків до ОРП МСТ КМ є актуальною задачею, яка дасть змогу виявити «білі плями» цього питання, визначити переваги та недоліки існуючих напрямів, допоможе обрати вектор подальшої наукової думки та визначитися з підходами та методами до ОРП МСТ колісних машин.

Основна частина. МСТ, як один із основних елементів майже будь-якої КМ, є цікавими об'єктами досліджень для багатьох авторів та освітлені у широкому ряді наукових праць. Але у межах нашого питання все ж більш цікаві наукові праці, які присвячені саме ОРП МСТ.

Виділяється декілька основних загальних напрямів проектування МСТ КМ.

Один із таких напрямів – вибір параметрів трансмісії, що впливають на тягово-швидкісні характеристики та паливну економічність автомобіля. До параметрів, які суттєво впливають на вищезазначені показники, відносять: число ступенів трансмісії та її передатні відношення. Підбір оптимуму цих параметрів дає змогу досягти якісного співвідношення характеристик двигуна та трансмісії. Збільшення кількості ступенів та діапазону трансмісії дає змогу ефективніше використовувати потужність двигуна в залежності від відсотка завантаженості транспортного засобу при експлуатації в різних дорожніх умовах. Більший інтервал обумовлює збільшення витрати палива, а також зниження динамічних якостей автомобіля, менший інтервал викликає у водія ускладнення при виборі необхідної передачі для оптимальної пристосованості транспортного засобу до заданих дорожніх умов.

Традиційно пропонували обирати передавальні числа трансмісії i_1, i_2, \dots, i_k за законом геометричної прогресії: $i_1 / i_2 = i_2 / i_3 = \dots = i_{k-1} / i_k = q$.

При миттєвому перемиканні під час розгону геометричний ряд відповідає використанню одного й того ж інтервалу частот обертання швидкісної характеристики двигуна. При перемиканні передач на реальному транспортному засобі час перемикання не дорівнює нулю. За цей час швидкість автомобіля знижується. Чим більше швидкість на час перемикання, тим більше її зниження. Це обумовлено ростом витрат енергії на подолання

опорів кочення колеса та повітря.

Щоб уникнути вказаних проблем, було запропоновано [1] наближати передатні числа більш високих передач: $i_1/i_2 \geq i_2/i_3 \geq \dots \geq i_{k-1}/i_k$. Вказана залежність забезпечує задовільні тягово-швидкісні властивості, але не враховує паливної економічності авто.

Також запропоновано [2] використовувати гармонійний закон:

$$\frac{1}{i_2} - \frac{1}{i_1} = \frac{1}{i_3} - \frac{1}{i_2} = \dots = \frac{1}{i_k} - \frac{1}{i_{k-1}} = q, \quad q = \frac{i_1 - i_k}{(k-1) \cdot i_1 \cdot i_k}.$$

Використання гармонійних рядів забезпечує більш інтенсивний розгін та більш високу середню швидкість при русі по шосе.

В іншій праці [3] автори зробили наголос на визначенні передатних відношень трансмісії, що є оптимальними з точки зору максимальної динаміки розгону військового автомобіля при різних дорожніх умовах, а також усунення жорсткої динаміки перемикання ряду передач. Авторами були розглянуті п'яти- та шестиступінчасті коробки передач (КП) у сумісності з двоступінчастою роздавальною коробкою. Також розглянуті різні конструктивні комбінації коробок передач, специфічні умови роботи та експлуатації. Для знаходження оптимального набору передатних чисел КП, з точки зору найкращої динаміки розгону, у якості цільової функції декількох змінних авторами запропоновано використати комплексну оцінку динамічності машини, для якої, відповідно, шукали максимальне значення. У результаті розв'язання задачі були знайдені варіанти розбивки передатних відношень, які дають змогу відчутно збільшити показник комплексної оцінки динамічності.

Автор наступної роботи [4] пропонує розробку методики оптимізації передатних чисел механічної ступінчастої трансмісії з урахуванням режимів роботи двигуна в залежності від бажаного призначення автомобіля. Враховуються раціональні співвідношення тягово-швидкісної та паливної економічності. Автор пропонує експериментально-розрахунковий метод визначення експлуатаційних показників автомобіля, який дає змогу з високою точністю проводити оцінку тягово-швидкісних властивостей та паливної економічності. У якості критеріїв оптимальності пропонується використати показники середнього часу за цикл подолання певного шляху, як показника динамічності, а для оцінки паливної економічності використовувати середні витрати палива за цикл. Далі, зважаючи на основні вимоги та критерії, автор пропонує за допомогою функції бажаності сформувати єдиний узагальнений критерій оптимальності. Пошук оптимального ряду передатних чисел проводиться за допомогою градієнтного метода безумовної нелінійної мінімізації з урахуванням конструктивних обмежень. Одночасно з оптимізацією передатних чисел проводиться оптимізація навантажувального режиму двигуна.

У роботі [5] розглянуто залежність паливної економічності та швидкісних властивостей лісовозного автомобіля залежно від вибору

параметрів двигуна і трансмісії. Наведено методику, яку автор рекомендує для розв'язування задач багатокритеріальної багатопараметричної оптимізації, що виникають на різних ієрархічних рівнях дослідження лісовозних автомобілів із метою покращення показників оцінки їх якості. Вказується, що були розроблені розрахункова і математична моделі та відповідна комп'ютерна програма, яка дає змогу моделювати поступальний рух автопотяга, що рухається зі змінною швидкістю з моменту зрушення з місця, з урахуванням процесу вмикання зчеплення та перемикання передач під час розгону до заданої швидкості. За основні параметри автопотяга приймаються: теоретична максимальна швидкість руху, питома потужність, номінальна частота обертання вала двигуна та вантажність автопотяга. У якості критеріїв оптимізації приймають час розгону автопотяга з місця до певної швидкості та середню витрату пального за час розгону, а також питому витрату пального на одиницю виконаної транспортної роботи. Розглядається багатокритеріальна чотирипараметрична задача оптимізації. Для розв'язання задачі оптимізації використано метод Соболя-Статнікова. Вибір найкращого варіанту виконували за мінімумом згортки критеріїв, який побудований за адитивним принципом (принципом справедливої поступки) з використанням вагових коефіцієнтів критеріїв.

У роботі [6] автор пропонує так званий динамічний ряд передатних чисел коробки передач, який дає змогу забезпечити найкращу прийнятність автомобілю. Автор пропонує скласти рівняння загального часу розгону автомобіля. Цей час дорівнює сумі часових інтервалів розгону на передачах з урахуванням часу на перемикання передач. Усі параметри автомобіля та дороги, крім передатних чисел коробки передач, є фіксованими. Передатні числа приймаються у якості параметрів проектування. Вказані параметри проектування безпосередньо впливають на час розгону автомобіля. Дослідження на екстремуми функції загального часу розгону дає змогу отримати динамічний ряд передатних чисел коробки передач.

Інша робота [7] розглядає розрахунок оптимальних передатних чисел трансмісії автомобіля як задачу багатокритеріальної оптимізації. У якості критеріїв нижчого рангу приймаються показники, що характеризують паливну економічність та тягово-швидкісні властивості автомобіля. Оцінка паливної економічності проводиться за наступними критеріями витрати палива: в міських їздових циклах, в магістральному їздовому циклі, при заданих сталих швидкостях руху автомобіля. Оцінка тягово-швидкісних властивостей автомобіля проводиться за критеріями: максимальний підйом, максимальна швидкість на горизонтальній ділянці шляху, час розгону з місця з перемиканням передач до заданої кінцевої швидкостей розгону, час розгону з місця з перемиканням передач на заданих мірних ділянках шляху тощо. Автор пропонує узагальнений критерій оптимальності, що є комбінацією

частинних критеріїв оптимальності з відповідними коефіцієнтами вагомості.

Автор наступної праці [8] пропонує визначати передатні числа коробки передач, виходячи з умов забезпечення максимальної інтенсивності розгону автомобіля та можливості тривалого руху при підвищеному дорожньому супротиві. У якості базового постулату висунуто, що значення передатних чисел визначаються за законом геометричної прогресії. Визначення передатного числа першої передачі автор пропонує обирати з умови відсутності буксування під час рушання з місця.

Вибір передатних відношень при заощадженні палива розглянуто у роботі [9]. Автори пропонують скласти математичну модель руху автомобіля. Ця математична модель реалізована у розповсюдженому пакеті програм, частково базується на експериментальних даних для різних умов руху та виливається у багатопараметричну задачу. Знаходження розв'язань даної задачі дає змогу отримати передатні числа трансмісії, а також, у випадку наявності автоматичного механізму перемикання передач, визначати ефективний час перемикання. Результати роботи підтверджені численними натурними експериментами.

Також заощадженню палива присвячено роботу [10]. Як і у попередній праці, автори пропонують експериментально-математичний підхід для створення імітаційної моделі та побудови задачі оптимізації. У якості змінних проектування виступають передатні числа трансмісії. Одними з важливих обмежень задачі автори вказують комфорт водія під час руху авто, а також при перемиканні передач. Розв'язання задачі здійснювалося багатоострівним генетичним алгоритмом.

Метою наступної роботи [11] є покращення динамічних властивостей автомобіля шляхом вдосконалення методу вибору основних параметрів моторно-трансмісійної установки за рахунок уточнення розрахунку аеродинамічного опору руху. Автори проводять уточнення вибору максимальної ефективної потужності двигуна та визначення максимальної конструктивної швидкості автомобіля, а також пропонують методіку вибору передатних чисел трансмісії. Останні запропоновано розраховувати за геометричною прогресією. Вибір передатних чисел трансмісії на нижчій та проміжних передачах передбачається робити за заданими величинами прискорень при зрушенні з місця і розгоні автомобіля. Передатне число трансмісії на нижчій передачі пропонується знаходити за допомогою індексу динамічності, який є відношенням максимального прискорення цього автомобіля при зрушенні з місця до аналогічного параметра найбільш динамічного автомобіля (автомобіля-лідера). Знаменник геометричної прогресії зміни передатних чисел трансмісії визначається з урахуванням ступеню досягнення граничного лінійного прискорення автомобілю.

У роботі [12] проведено аналіз та оцінку вибору моментів перемикання передач у ступінчастій механічній трансмісії автомобіля на режимах розгону і сповільнення з умов паливної економічності. Детально

розглянуті теоретичні засади організації процесів перемикання передач за допомогою фрикціонів при умовах нерозривної передачі силового потоку (при замкнутому зчепленні) та одночасного автоматичного коригування швидкісного і навантажувального режимів роботи двигуна внутрішнього згоряння. Проведені аналітичні дослідження засвідчили найменші значення: витрати палива, відхилення від заданої водієм програми руху та роботи буксування фрикціонів (втрата енергії) під час перемикання передач на тяговому режимі при автоматичному коригуванні режимів роботи двигуна. Застосування динамічного перехідного режиму двигуна також має перевагу над іншими алгоритмами керування при сповільненні (зворотні перемикання) автомобіля. Вказується, що опрацьовані алгоритми автоматичного керування режимів роботи двигуна у процесі перемикання передач ступінчастої трансмісії є актуальними і для механічних трансмісій з двома зчепленнями, які при перемиканні передач із використанням синхронізаторів дають змогу забезпечити нерозривність передачі силового потоку. Процес перемикання передач є настільки швидкоплинним, що лінеаризоване відтворення режимів роботи системи «двигун – трансмісія» є цілком природним та таким, що не може спотворити уявлення про оптимальність функціонування цієї системи. Автором були проведені дорожні дослідження та імітаційне моделювання цих алгоритмів у програмному середовищі, а також доведена ефективність реалізації алгоритмів керування двигуном у процесі перемикання передач (реалізованих за допомогою відповідного перепрограмування електронного блока управління двигуном та коробкою передач) як у фазі розгону, так і сповільнення. Описаний алгоритм оптимального керування трансмісією автомобіля створює підстави формувати вмотивовані настанови для водія щодо вибору моментів перемикання передач та у випадку суто ручного керування автомобілем.

Іншим напрямком проектування МСТ є врахування динаміки крутильних коливань.

У роботі [13] запропоновано метод визначення характеру зміни енергії крутильних коливань у блокуванні трансмісії з урахуванням зміни в експлуатації радіусів його коліс та удосконалено метод управління тиском повітря в шинах повнопривідного автомобіля. Метод базується на отриманій математичній моделі взаємозв'язку кута закручування вала трансмісії зі змінними у часі силами, до нього прикладеними. Здійснено комп'ютерне моделювання коливань енергії у трансмісії повнопривідного автомобіля в пакеті прикладних програм, що дало змогу автору побудувати графіки зміни енергії крутильних коливань трансмісії у часі при різних законах зміни моменту супротиву на колесах повнопривідного автомобіля. Проведені дорожні експериментальні дослідження. Як кінцевий результат, автором запропоновані система управління тиском у шинах повнопривідного автомобіля та алгоритми її роботи, що дають змогу не допустити кінематичного розгалуження у трансмісії шляхом регулювання радіусів кочення коліс на його осях при русі в різних

дорожніх умовах та в умовах бездоріжжя, а також при різному навантаженні.

Автори праці [14] пропонують розглядати динамічну схему трансмісії повнопривідного автомобіля з реактивними контурами. Реактивні контури – це контури, що враховують жорсткість закріплення корпусних деталей на рамах машин. У трансмісіях автомобілів це – жорсткість опор двигуна та жорсткість на викручування підвісок ведучих мостів стосовно центрів обертання півосей, які передають крутні моменти до коліс автомобіля. Трансмісія повнопривідного автомобіля складається з багатьох обертових мас, які через редуктори з'єднані з валами різної крутильної жорсткості. Ці маси, вали і корпуси редукторів утворюють складну динамічну коливну систему. Зовнішні сили, що діють на систему, викликають в ній закручування пружних валів та складні взаємні переміщення мас. Це спричиняє появу змінних динамічних моментів, які навантажують різні деталі системи. Такий підхід дає змогу отримати математичні залежності між частотами власних крутильних коливань та параметрами реактивних контурів ще на стадії проектування трансмісії автомобіля. Врахування реактивних контурів дає змогу також уточнити значення динамічного моменту, що виникає у трансмісії під час різкого вмикання зчеплення, або під час гальмування коліс до юзу без вимкнення зчеплення.

Робота [15] присвячена побудові динамічної та математичної моделі для розрахунку динамічних навантажень трансмісії гібридного автомобіля з паралельною компоновальною схемою. Динамічна модель, що запропонована авторами, відображає інерційні, пружні та дисипативні властивості трансмісії. Математична модель отримана на підставі рівняння Лагранжа II роду та містить сім узагальнених координат. У результаті комп'ютерного імітаційного моделювання автори доводять твердження про те, що при протіканні перехідних процесів у трансмісії автомобіля динамічні навантаження можуть у кілька разів перевершувати максимальний момент силової привідної установки.

Іншим вектором наукової думки є роботи, присвячені раціональному розподілу крутних моментів між ведучими колесами. Як вказують автори [16], при розробці автомобільних трансмісій для повнопривідних автомобілів це питання завжди є актуальним для розробників. У повнопривідних автомобілях для розподілу крутного моменту у вузлах розгалуження потужності широко застосовують міжосьові та міжколісні диференціали з можливістю їх блокування, які розташовуються в роздавальних коробках та в головних передачах мостів відповідно. Шляхом критичного аналізу великої кількості літератури автори зробили висновок, що думки щодо оптимального розподілу потужності по осях та колесах автомобіля неоднозначні. Зазначають, що пропозиції про більшу навантаженість задніх осей та використання міжколісних диференціалів, що самоблокуються, диференціалів підвищеного тертя, повного блокування міжколісних диференціалів пов'язані з бажанням підвищити прохідність автомобілів із

механічними трансмісіями на деформованих неоднорідних ґрунтах. Вони спрямовані на підвищення зчіпних властивостей при припущенні, що більшість ґрунтів є такими, що ущільнюються. Забезпечення мінімальних витрат потужності на рух є багато в чому протилежним завданням, оскільки воно пов'язано не зі зчіпними властивостями коліс автомобілів, а з подоланням кожним колесом свого опору руху. Вказується, що більшість сучасних авторів сходиться на думці, що необхідне автоматизоване управління підведенням потужності до коліс залежно від умов руху.

Іншим дуже цікавим напрямком проектування трансмісій є підходи, які побудовані на їх структуруванні. Автори роботи [17] пропонують тлумачити механічну трансмісію автомобіля як систему багатоланкових диференціалів зі структурою, що може бути змінена. Узагальнене відображення трансмісії в середовищі автоматизованого проектування розкриває можливість у процесі оптимізації конструкцій машин будувати найрізноманітніші варіації структур. Це дає змогу не обмежуватись лише варіюванням параметрів трансмісії в рамках певної структури. Як узагальнений структурний елемент автори пропонують використати абстрактний гіперболоїдний планетарний механізм, який можна звести до будь-якого звичного диференціала. Узагальнений багатоланковий диференціал – це структурна одиниця, яка покликана формально відображати будь-яку незмінювану частину трансмісії якої завгодно складності та якої завгодно будови. Узагальнену трансмісію тлумачать як набір узагальнених диференціалів, поєднаних у систему за допомогою елементів керування – зчеплень, гальм, фрикціонів, зубчастих муфт, муфт вільного бігу (ходу, обгінних), синхронізаторів. У такому разі перемикання передач – це вмотивована зміна внутрішньої структури трансмісії за допомогою згаданих елементів керування. Як вказують автори, обставини, за яких має змінюватись внутрішня структура – це також предмет оптимізаційного дослідження, це пошук оптимальних законів перемикання передач.

Наступна група робіт присвячена безпосередньо ОРП у межах визначення параметрів проектування окремих вузлів та агрегатів, що містять зубчасті передачі та трансмісії.

Робота [18] присвячена розробці наукових основ багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення та надійності під час експлуатації. Автором запропоновано математичну модель динамічних процесів у циліндричних зубчастих передачах редукторів для дослідження якості виготовлення робочих поверхонь зубців коліс. Модель дає можливість визначити вплив якості на зміну внутрішніх динамічних навантажень. Також розглянуто методологію прогнозування надійності циліндричних редукторів з використанням методу статистичного моделювання. Розроблено оптимізаційну математичну модель для синтезу

конструктивних параметрів корпусів одноступінчастого та двоступінчастого циліндричних редукторів. Також побудовано оптимізаційну математичну модель синтезу параметрів вала редуктора з урахуванням його конструктивних особливостей та напружено-деформованого стану. Для реалізації методу багатопараметричного синтезу автор пропонує інженерний метод із застосуванням інформаційних систем на основі дискретного програмування.

Наступна робота [19] представляє методологію розробки системи оптимально-раціонального проектування зубчастих редукторів, що входять до складу трансмісії автомобіля. Автор пропонує здійснювати пошук оптимально-раціональних рішень методом допустимих множин. У переліку важливих проблем оптимального синтезу є вибір множини параметрів оптимізації. Необґрунтоване збільшення останніх ускладнює задачу та, як правило, ускладнює пошук оптимального рішення. Етапу постановки задачі оптимізації передують пошук ефективних параметрів оптимізації. За методом допустимих множин такий пошук здійснюється автоматично у процесі аналізу таблиць іспитів та вибору границь критеріїв якості. Вказується, що запропонований підхід дає змогу при виборі оптимально-раціональних рішень не обмежувати кількість критеріїв якості та враховувати кожний із них, а також керувати процесом вибору оптимально-раціонального рішення. Ключем методики є «Рада спеціалістів», яка встановлює обмеження на критерії оптимізації. Автор наголошує, що оптимізація з використанням «Ради спеціалістів» не потребує створювати суб'єктивний глобальний критерій якості, не вимагає комбінувати, зменшувати один критерій за рахунок інших, а може поетапно розглядати кожен із критеріїв.

Автори праці [20] пропонують алгоритм оптимізації тривальних коробок передач. Алгоритм є суміщенням методів ЛПт-пошуку та звуження околу. Постановка задачі містить змінні проектування, обмеження на параметри проектування та цільові функції за критеріями: міжосьова відстань, довжина та маса коробки передач. Авторами було запропоновано для розв'язання вказаної задачі сумістити методи ЛПт-пошуку та звуження околу, які обкреслюються обмеженнями на змінні проектування, для знаходження більш якісного рішення. Рішення знаходиться шляхом послідовного звуження n -вимірної паралелепіпеду параметрів відносно мінімального значення цільової функції, яке знаходиться сортуванням ЛПт-точок даного простору. Вибір дільників звуження околу здійснюється також за псевдо-випадковим законом розподілення. Таким чином, було отримано методику та алгоритм оптимізаційного процесу, який дозволяє якісно та з мінімальними витратами часу виконувати розв'язання задачі.

Розвиток попереднього методу надано в [21]. Робота висвітлює розв'язання задачі оптимізації трансмісії легкого багатоцільового транспортера-тягача. Створено математичну модель оптимізації

трансмісії за масою, а саме: побудовано цільову функцію; визначені змінні проектування, у якості яких обрані основні геометричні параметри зачеплень: модулі та числа зубців; сформовано систему обмежень на змінні проектування та запропоновано методику динамічного зміння обмежень на числа зубців коробки передач. Розв'язання виконується на основі зондування простору параметрів, де як пробні точки використовуються точки ЛПт-послідовності. Також було розроблено прикладну методику та докладний алгоритм оптимального проектування трансмісії. Особливістю алгоритму є наявність зовнішньої та внутрішньої ЛПт-послідовностей. У зовнішньому циклі генерується ЛПт-послідовність для більшості змінних проектування, а у внутрішньому – інші змінні, граничні обмеження яких залежать від попередніх змінних проектування. Така побудова алгоритму зменшує час розрахунків та збільшує точність розв'язку завдяки звуженню обмежень для останніх змінних.

Як і [19], робота [22] присвячена задачі раціонального проектування зубчастих циліндричних двоступінчастих редукторів за декількома критеріями. Підхід базується на аналізі пробних точок, що отримані при використанні ЛПт-пошуку та обчисленні для пробних точок окремих критеріїв. Після пропонується перейти від багатьох критеріїв до одного за допомогою введення проектувальником шкали важливості, призначення важливості кожного з критеріїв та знаходження для кожної пробної точки відносного зміщення бажаного розв'язку. Об'єднання критеріїв за зміщеннями бажаного розв'язку відносно дійсного пропонується виконати як середнього арифметичного квадратичного зваженого. Таким чином, у проектувальника з'являється можливість розв'язувати багатокритеріальні задачі, перетворюючи їх на однокритеріальні, а введений критерій має фізичний зміст – відносне наближення пробної точки до бажаного розв'язку.

Наступний цикл робіт [23–25] освітлює питання використання псевдовипадкових послідовностей в еволюційних алгоритмах при раціональному проектуванні зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач. Авторами здійснюють аналіз еволюційних алгоритмів, що дає змогу критично оцінити можливі етапи, на яких актуально використовувати ЛПт-послідовності як псевдовипадковий фактор для збільшення «випадковості» у процесі проектування. Також автори пропонують свою модифікацію еволюційного алгоритму, завдяки якій розв'язується задача вибору оптимальних геометричних параметрів зачеплень двоступінчастого циліндричного редуктора у випадку багатьох критеріїв. Пропонується віддати на розсуд псевдовипадковому процесу наступні етапи: генерація початкової сукупності пробних точок (початкової популяції), вибір батьківських пар, схрещування та мутацію. Алгоритм побудований таким чином, що проходячи певну кількість циклів, популяція життєздатних особин поступово

поповнюється. У кінці циклу отримуємо популяцію точок, яка аналізується за значенням об'єднаної цільової функції та сортується. На виході алгоритму отримуємо одну або кілька провідних точок, що визначають розв'язки задачі. Наведено розв'язання задачі вибору оптимальних параметрів для редуктора, результати якого підтверджують адекватність методики.

Цікавою є робота [26], присвячена оптимальному проектуванню зацеплення з опукло-увігнутих контактом зубців. Як об'єкт дослідження авторами обрано С-С зацеплення, воно запропоновано словацькими вченими М. Бошанські та М. Вереш. У їхніх роботах пропонується створювати опукло-увігнутий профіль зубця шестерні по попередньо заданій лінії зацеплення. При цьому лінія зацеплення складається або з двох симетричних відносно полюса зацеплення дуг (дуги рівного радіусу) або з несиметричних дуг (дуги нерівних радіусів). У разі симетричної лінії зацеплення має місце увігнуто-опуклий контакт, а в разі несиметричної – опукло-увігнутий. Як критерії оптимальності пропонується: мінімальні контактні напруження та (або) мінімальні відносні швидкості ковзання з урахуванням конструктивних, геометричних та технологічних обмежень. Як змінні проектування пропонується: кут зацеплення в полюсі, радіус кривизни верхньої частини лінії зацеплення та радіус кривизни нижньої частини лінії зацеплення. Обрано метод розв'язання задачі оптимального проектування, а саме, зондування простору параметрів за допомогою ЛПТ-послідовності.

Як можна спостерігати, питання ОРП МСТ досить широко розглядається у технічній літературі. Також звертає увагу на себе різноплановий спектр базових питань, що підіймають проектувальники під час ОРП МСТ. Основні концепції при проектуванні це:

- розгляд всієї МСТ як системи;
- розгляд вузлів та агрегатів МСТ;
- розгляд окремих елементарних складових трансмісії – зубчастих зацеплень, валів, картерів ...;
- освітлення питань кінематики, динаміки, ергономіки, комплексні рішення...

Спектр методів, які застосовуються для розв'язання задач ОРП МСТ, теж досить широкий: він охоплює аналітичні методи, класичні підходи оптимізації, використання генетичних та еволюційних алгоритмів тощо.

Візуалізуємо надану інформацію стосовно ОРП МСТ на рис. 1. Така візуалізація не є остаточною. Проектувальник може доповнювати «віяла» елементів додатковими складовими.

Зручність такого графічного подання полягає у швидкому орієнтуванні між існуючими комбінаціями наукових думок та створенням нових варіантів. З кожного «віяла» елементів потрібно виділити не менше одного складового. Наприклад, авторам цікава та розробляється комбінація, що зображена у центрі рис. 1, яка охоплює трансмісію та її агрегати як об'єкт дослідження, напрямом є отримання оптимальних геометричних параметрів об'єкту, а як підхід до розв'язання задачі – використання еволюційних алгоритмів. Також стає наочно зрозуміло, що ми маємо

можливість долучити до задачі додаткові складові, наприклад, аналіз динаміки чи структурні дослідження.

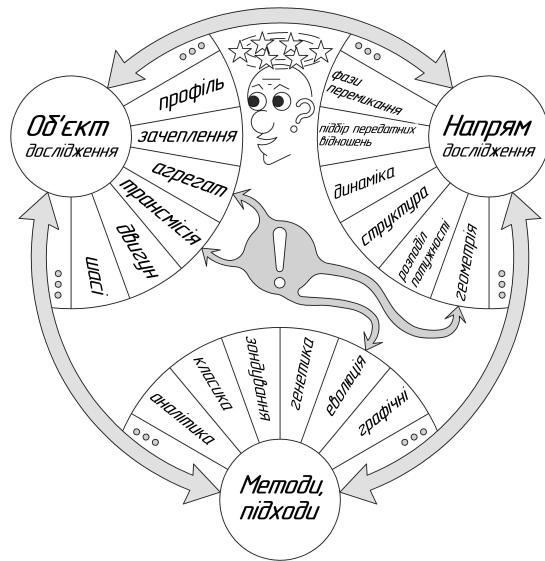


Рисунок 1 – Елементи ОРП МСТ та взаємозв'язки між ними

Висновки:

1. Описано актуальність ОРП МСТ КМ та основні положення стосовно проблем та особливостей розв'язання вказаної задачі. Це дає змогу зрозуміти необхідність висвітлення вказаної теми та проведення досліджень літературних джерел стосовно цього питання.

2. Освітлено основні загальні напрями проектування МСТ КМ: вибір параметрів трансмісії, врахування динаміки крутильних коливань, раціональний розподіл крутних моментів між ведучими колесами, розподіл потужностей у трансмісії, обрання раціональних фаз перемикання тощо. Описані основні об'єкти досліджень та розповсюджені методи розв'язання задач проектування. Це дає змогу зрозуміти хід наукової думки стосовно цього питання, виявити «білі плями», визначити переваги та недоліки існуючих напрямів, а також допомагає обрати вектор подальших наукових ідей і визначитися з актуальними підходами та методами до ОРП МСТ КМ.

3. Надано графічне подання викладеного матеріалу, яке дає змогу швидко орієнтуватися у широкому спектрі питань, а при необхідності модифікувати існуючі чи синтезувати нові задачі.

Список літератури

1. Чудаков Е. А. *Теория автомобиля*. Москва: Машгиз, 1950. 343 с.
2. Хлыстов Ф. Л. *Тяговые расчеты гусеничных и колесных автомашин*. Москва: ОНТИ-НКТП-СССР, 1937. 144с.
3. Володонец Д. О., Веретенников Е. А., Костяник И. В., Пасечный С. С., Воронцов С. Н., Пылева Т. К. К вопросу оптимизации передаточных чисел планетарной коробки передач бронетранспортера БТР-4. *Механика та машинобудування*. Харків, НТУ «ХП», 2014. № 1. С. 75–82.
4. Русаков С. С. *Разработка методики оптимизации передаточных чисел механической ступенчатой трансмиссии легкового автомобиля с учетом режимов работы его двигателя: автореф.*

- дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины». Тольятти, 2007. 30 с.
5. Шевченко Н. В. Методика выбору оптимальных параметров двигателя та механічної трансмісії лісовозного автомобіля. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, НЛТУ України, 2009. Вип. 19.7. С. 117–123.
 6. Куликов Н. К. Динамический ряд передаточных чисел коробки передач. *Автомобильная промышленность*. 1958. №12. С. 19–22.
 7. Филькин Н. Н. Оптимизация передаточных чисел и количества ступеней трансмиссии легкового автомобиля: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины». Москва, 1990. 21 с.
 8. Руктешель О. С. Выбор параметров и оценка тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля : учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-37 01 02 «Автомобилестроение», 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей», 1-37 01 07 «Автосервис», 1-44 01 01 «Организация перевозок и управление на автомобильном и городском транспорте», 1-44 01 02 «Организация дорожного движения». Минск: БНТУ, 2015. 80 с.
 9. Chengsheng Miao, Haiou Liu, Guoming G Zhu. Three-parameter transmission gear-shifting schedule for improved fuel economy. *IMEchE Part D: J Automobile Engineering*. 2017. 232(4). P. 521–533.
 10. Meichun Peng, Junyan Lin, Xuqi Liu. Optimizing design of powertrain transmission ratio of heavy duty truck. *IFAC PapersOnLine* 51-31. 2018. P. 892–897.
 11. Подригало М. А., Краснокутський В. М., Кашканов В. А., Ткаченко О. С., Янчик О. Г. Покращення тягового-швидкісних властивостей вдосконаленням методів вибору параметрів моторно-трансмісійної установки автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, ВНТУ, 2021. № 1(13). С. 111–117.
 12. Пельо Р. А. Підвищення паливоощадності автотранспортного засобу формуванням раціональних законів та алгоритмів перемикання передач трансмісії: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.02. Львів, 2019. 221с.
 13. Потапов М. М. Підвищення ефективності функціонування елементів шасі повнопривідних колісних засобів транспорту: автореф. дис. на здобуття наук .ступеня канд.техн.наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». Харків, 2021. 20с.
 14. Білик Б. В., Борис М. М., Кусий А. Г. Крутильні коливання в трансмісіях повнопривідних машин з реактивними контурами. *Наук. вісник НЛТУ України*. Львів, НЛТУ України, 2008. Вип. 18.2. С. 236–241.
 15. Имангулов А. Р., Филькин Н. М. Исследование динамических процессов трансмиссии гибридного автомобиля. *Modern directions of theoretical and applied researches. SWorld – 17-29 March*. 2015. URL: <http://www.sworld.education/index.php/ru/conference/the-content-of-conferences/archives-of-individual-conferences/march-2015> (дата звернення 16.12.2021).
 16. Сайкин А. М., Плиев И. А., Архипов А. В., Коршунов Г. В. Об оптимизации распределения мощности по осям и колесам полноприводных автомобилей в зависимости от дорожных условий. *Журнал Автомобильных Инженеров*. 2011. № 3 (68). С. 34–37.
 17. Гашук П. М., Нікіпчук С. В. Алгоритм структурування трансмісій мобільних машин у середовищі автоматизованого проектування. *Вісник ЛДУ БЖД*. Львів, ЛДУ, 2017. № 15. С. 124–146.
 18. Васильєва О. Е. Багатопараметричний синтез конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення та надійності трансмісії: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Львів, 2018. 395с.
 19. Калінін П. М. Оптимально-раціональне проектування зубчастих редукторів трансмісії автомобіля. *Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Проблеми механічного приводу*. Харків, НТУ «ХПІ», 2012. № 35. С. 51–58.
 20. Бондаренко О. В., Устиненко О. В. Оптимізація співвісних ступінчастих приводів машин по масогабаритним характеристикам на прикладі тривалих коробок передач. *Вестник СевНТУ: Зб. наукових праць: Сер.: Механіка, енергетика, екологія*. Севастополь, СевНТУ, 2012. Вип. 133/2012. С. 27–33.
 21. Андрієнко С. В., Устиненко О. В., Бондаренко О. В., Ключков І. С. Математична модель та алгоритм оптимізації за масою трансмісії гусеничного транспортера-тягача МТ-ЛБ. *Прикладні питання математичного моделювання*. Херсон, ХНТУ, 2020. Т. 3, № 2.2 С. 16–23.
 22. Бондаренко О. В., Устиненко О. В., Сериков В. І. Приклад раціонального проектування зубчастого циліндричного двоступінчастого редуктору методом псевдовипадкового пошуку при багатьох критеріях. *Вісник НТУ «ХПІ»: Серія: Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ», 2018. № 25. С. 31–35.
 23. Бондаренко О. В., Устиненко О. В. Використання псевдовипадкових послідовностей в еволюційних алгоритмах при раціональному проектуванні зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач. *Вісник НТУ «ХПІ»: Серія: Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ», 2019. № 1. С. 3–9.
 24. Bondarenko O., Ustynenko O., Serykov V. Solving the problem of rational design for a two-stage reducer by using a modified evolutionary algorithm. *Proceedings of 7th International BAPT Conference Dedicated to the 90th Anniversary of Prof. Kiril Arnaudov «Power Transmissions 2020», June 10–13, 2020, Borovets, Bulgaria*. Sofia, Bulgaria: Scientific-technical union of mechanical engineering «Industry-4.0», 2020. P. 115–122.
 25. Бондаренко О. В., Устиненко О. В., Ключков І. С., Сериков В. І., Воронцов Б. С., Кириченко І. О. Приклад багатокритеріальної оптимізації двоступінчастого редуктора за допомогою модифікованого еволюційного алгоритму. *Вісник НТУ «ХПІ»: Серія: Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ», 2020. № 2. С. 7–12.
 26. Устиненко О. В., Левін Н. О., Бондаренко О. В., Бошанські М., Протасов П. В., Андрієнко С. В., Мапошенко М. В. Оптимальне проектування циліндричних зубчастих передач з опукло-увігнутим контактом: цільова функція та змінні проектування. *Вісник НТУ «ХПІ»: Серія: Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ», 2021. № 2. С. 129–134.

References (transliterated)

1. Chudakov E. A. *Teoriya avtomobilja* [The theory of the car]. Moscow: Mashgiz Publ, 1950. 343 p.
2. Hlystov F. L. *Tjagovyje raschety gusenichnyh i kolesnyh avtomashin* [Traction calculations of caterpillar and wheeled vehicles]. Moscow: ONTI-NKTP-SSSR Pub, 1937. 144p.
3. Voloncevich D. O., Veretennikov E. A., Kostjanik I. V., Pasechnyj S. S., Voroncov S. N., Pyleva T. K. K voprosu optimizacii peredatochnykh chisel planetarnoj korobki peredach bronetransportera BTR-4 [On the issue of optimizing the gear ratios of the planetary gearbox of the BTR-4 armored personnel carrier]. *Mehanika ta mashinobuduvannja* [Mechanics and mechanical engineering]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2014, no. 1, pp. 75–82.
4. Rusakov S. S. *Razrabotka metodiki optimizacii peredatochnykh chisel mehanicheskoi stupenchatoj transmissii legkovogo avtomobilja s uchedom rezhimov raboty ego dvigatelja: avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.05.03. «Kolesnye i gusenichnye mashiny»* [Development of a technique for optimizing the gear ratios of a mechanical stepped transmission of a passenger car, taking into account the operating modes of its engine: abstract of Ph.D. dis. for the degree of Cand. tech. Sciences: spec. 05.05.03. «Wheeled and tracked vehicles»]. Tolyatti, 2007. 30p.
5. Shevchenko N. V. *Metodyka vyboru optymalnykh parametriv dyvguna ta mexanichnoyi transmissiyi lisovoznogo avtomobilya* [Methods for selecting the optimal parameters of the engine and mechanical transmission of a timber truck]. *Naukovyj visnyk NLTU Ukrayiny* [Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine]. Lviv, NLTU of Ukraine, 2009, vol. 19.7, pp. 117–123.
6. Kulikov N. K. *Dinamicheskij rjad peredatochnykh chisel korobki peredach* [Dynamic range of gear ratios]. *Avtomobil'naja promyshlennost'* [Automotive industry]. 1958, no.12, pp. 19–22.
7. Fil'kin N. N. *Optimizacija peredatochnykh chisel i kolichestva stupeney transmissii legkovogo avtomobilja: avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk: 05.05.03 «Kolesnye i gusenichnye mashiny»* [Optimization of gear ratios and the number of stages of transmission of a passenger car: author. dis. for the degree of Cand. tech. Sciences: 05.05.03 "Wheeled and tracked vehicles"]. Moscow, 1990. 21 p.
8. Ruktshel' O. S. *Vybor parametrov i ocenka tjagovo-skorostnyh i toplivno-jekonomicheskikh svojstv avtomobilja : uchebno-metodicheskoe posobie dlja studentov special'nostej 1-37 01 02 «Avtomobilestroenie», 1-37 01 06 «Tehnicheskaja jekspluatacija avtomobilej», 1-37 01 07 «Avtoservis», 1-44 01 01 «Organizacija perevozok i upravlenie na avtomobil'nom i gorodskom transporte», 1-44 01 02 «Organizacija dorozhnogo dvizhenija* [The choice of parameters and the assessment of the traction-speed and fuel-economic properties of the car: a teaching aid for students of specialties 1-37 01 02 «Automotive», 1-37 01 06 «Technical operation of cars», 1-37 01 07 «Car service», 1-44 01 01 «Organization of transportation and management of road and city transport», 1-44 01 02 «Organization of

- road traffic»]. Minsk: BNTU Publ, 2015. 80 p.
9. Chengsheng Miao, Haiou Liu, Guoming G. Zhu. Three-parameter transmission gear-shifting schedule for improved fuel economy. *IMECH Part D: J Automobile Engineering*. 2017, no. 232(4), pp. 521–533.
 10. Meichun Peng, Junyan Lin, Xuqi Liu. Optimizing design of powertrain transmission ratio of heavy duty truck. *IFAC PapersOnLine 51-31*. 2018, pp. 892–897.
 11. Podrygalo M. A., Krasnokutskiy V. M., Kashkanov V. A., Tkachenko O. S., Yanchyk O. G. Pokrashhennya tyagovogo-shvydkisnykh vlastyvostrykh vdoskonalennym metodiv vyboru parametriv motorno-transmisiynoi ustanovky avtomobilya [Improving traction and speed properties by improving the methods of selecting the parameters of the motor-transmission installation of the car]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transport* [Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. Vinnytsia]. Vinnytsia, VNTU, 2021, no.1(13), pp. 111–117.
 12. Peľo R. A. *Pidvyshhennya palyvooshadnosti avtotransportnogo zasobu formuvannam racional'nykh zakoniv ta alhorytmiv peremykannya peredach transmisiyi: dys. ... kand. techn. nauk: 05.22.02* [Improving the fuel economy of the vehicle by forming rational laws and algorithms for shifting gears: dis. ... Cand. tech. Science: 05.22.02]. Lviv, 2019. 221p.
 13. Potapov M. M. *Pidvyshhennya efektyvnosti funkcionuvannya elementiv shasi povnoprividnykh kolisnykh zasobiv transportu: avtoief. dys. na zdobutya nauk .stupenya kand.techn.nauk: specz. 05.22.20 «Ekspluatatsiya ta remont zasobiv transportu»* [Improving the efficiency of the chassis elements of all-wheel drive vehicles: author's ref. dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences: special. 05.22.20 «Operation and repair of vehicles»]. Kharkiv, 2021. 20 p.
 14. Bilyk B. V., Borys M. M., Kusyj A. G. Krutylni kolyvannya v transmisiyakh povnoprividnykh mashyn z reaktivnymy konturamy [Torsional vibrations in the transmissions of all-wheel drive vehicles with jet circuits]. *Nauk. visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine]. Lviv, NLTU of Ukraine, 2008, vol. 18.2, pp. 236–241.
 15. Imangulov A. R., Fil'kin N. M. Issledovanie dinamicheskikh processov transmisiy gibridnogo avtomobilja [Investigation of the dynamic processes of the transmission of a hybrid vehicle]. *Modern directions of theoretical and applied researches. SWorld – 17-29 March. 2015*. URL: <http://www.sworld.education/index.php/ru/conference/the-content-of-conferences/archives-of-individual-conferences/march-2015>.
 16. Sajkin A. M., Pliev I. A., Arhipov A. V., Korshunov G. V. Ob optimizatsii raspredeleniya moshhnosti po osjam i kolesam polnoprivodnykh avtomobilej v zavisimosti ot dorozhnykh uslovij [On the optimization of the distribution of power along the axles and wheels of all-wheel drive vehicles, depending on road conditions]. *Zhurnal Avtomobil'nykh Inzhenerov* [Automotive Engineers Magazine]. 2011, no. 3 (68), pp. 34–37.
 17. Gashhuk P. M., Nikipchuk S. V. Alhorytm strukturuvannya transmisiy mobil'nykh mashyn u seredivovshhi avtomatyzovanogo proektuvannya [Algorithm for structuring mobile machine transmissions in an automated design environment]. *Visnyk LDU BZhd* [Bulletin of LSU BJD]. Lviv, LDU, 2017, no.15, pp. 124–146.
 18. Vasylyeva O. E. *Bagatoparametrychnyj syntez konstruktivnykh elementiv cylindrychnykh reduktoriv z uraxuvannam osoblyvostej yix vygotovlennya ta nadijnosti transmisiyi: dys. ... kand. techn. nauk: 05.02.02*. [Multiparametric synthesis of structural elements of cylindrical gearboxes, taking into account the peculiarities of their manufacture and reliability of the transmission: dis. ... Cand. tech. Science: 05.02.02.]. Lviv, 2018. 395p.
 19. Kalinin P. M. Optymal'no-racional'ne proektuvannya zubchastykh reduktoriv transmisiyi avtomobilya [Optimal and rational design of gears of car transmission]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2012, no. 35, pp. 51–58.
 20. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V. Optyimizatsiya spivvisnykh stupinchastykh pryvodiv mashyn po masogabarytnym karakterystykam na prykladni trival'nykh korobok peredach [Optimization of coaxial step drives of cars on mass and size characteristics on an example of long gearboxes]. *Vestnyk SevNTU: Zb. naukovykh prac' : Ser.: Mexanika, energetyka, ekologiya* [Bulletin of SevNTU: Coll. scientific works: Mechanics, energy, ecology. Sevastopol]. Sevastopol, SevNTU, 2012, vol. 133/2012, pp. 27–33.
 21. Andriyenko C. V., Ustynenko O. V., Bondarenko O. V., Klochkov I. Ye. Matematychna model' ta alhorytm optyimizatsiyi za masoyu transmisiyi gusenychnogo transportera-tyagacha MT-LB [Mathematical model and algorithm of optimization by transmission mass of MT-LB crawler conveyor-tractor]. *Prykladni pytannya matematychnogo modelyuvannya* [Applied questions of mathematical modeling. Kherson]. Kherson, KhNTU, 2020, vol. 3, no. 2.2, pp. 16–23.
 22. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V., Syerykov V. I. Pryklad racional'nogo proektuvannya zubchastogo cylindrychnogo dvostupinchastogo reduktora metodom psevdovy'padkovogo poshuku pry' bagat'ox kry'teriyax [Example of rational design of toothed cylindrical two-stage gearbox by pseudo-random search method with many criteria]. *Visnyk NTU «KhPI»: Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR* [Bulletin of NTU «KhPI»: Series: Mechanical Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2018, no. 25, pp. 31–35.
 23. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V. Vykorystannya psevdovy'padkovy'x poslidovnostej v evolyucijnykh alhorytmakh pry racional'nomu proektuvanni zubchastykh cylindrychnykh reduktoriv ta korobok peredach [The use of pseudo-random sequences in evolutionary algorithms in the rational design of toothed cylindrical gearboxes and gearboxes]. *Visnyk NTU «KhPI»: Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR* [Bulletin of NTU «KhPI»: Series: Mechanical Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2019, no. 1, pp. 3–9.
 24. Bondarenko O., Ustynenko O., Serykov V. Solving the problem of rational design for a two-stage reducer by using a modified evolutionary algorithm. *Proceedings of 7th International BAPT Conference Dedicated to the 90th Anniversary of Prof. Kiril Arnaudov «Power Transmissions 2020» June 10–13, 2020, Borovets, Bulgaria*. Sofia, Bulgaria: Scientific-technical union of mechanical engineering «Industry-4.0», 2020, pp. 115–122.
 25. Bondarenko O. V., Ustynenko O. V., Klochkov I. Ye., Syerykov V. I., Voronciov B. S., Kyrychenko I. O. Pryklad bagatokryterial'noyi optyimizatsiyi dvostupinchastogo reduktora za dopomogoyu modyfikovanogo evolyucijnogo alhorytmu [Example of multicriteria optimization of a two-stage gearbox using a modified evolutionary algorithm]. *Visnyk NTU «KhPI»: Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR* [Bulletin of NTU «KhPI»: Series: Mechanical Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2020, no. 2, pp. 7–12.
 26. Ustynenko O. V., Levin N. O., Bondarenko O. V., Boshanski M., Protasov R. V., Andriyenko C. V., Matyushenko M. V. Optymal'ne proektuvannya cylindrychnykh zubchastykh peredach z opuklo-uvignutym kontaktom: cil'ova funktsiya ta zminni proektuvannya [Optimal design of cylindrical gears with convex-concave contact: objective function and design variables]. *Visnyk NTU «KhPI»: Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR* [Bulletin of NTU «KhPI»: Series: Mechanical Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2021, no. 2, pp. 129–134.

Надійшло (received) 23.01.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олексій Вікторович (Бондаренко Алексей Викторович, Bondarenko Oleksiy) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (067) 189-97-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; e-mail: avbondko@gmail.com

Устиненко Олександр Віталійович (Устиненко Александр Витальевич, Ustynenko Oleksandr) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6714-6122>; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org