

УДК 629.424.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-36>

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КУЛАЧКОВИХ МЕХАНІЗМІВ У ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Фомін Олексій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри вагонів та вагонного господарства
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

Логвіненко Олександр Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механіки і проєктування машин
Українського державного університету залізничного транспорту
ORCID ID: 0000-0002-5731-7995

Сагін Сергій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри суднових енергетичних установок
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0000-0001-8742-2836

Бурсук Олександр Миколайович,

кандидат педагогічних наук,
викладач технічних дисциплін циклової комісії бакалаврату
Київського електромеханічного фахового коледжу
ORCID ID: 0000-0002-4812-7831

Муравйов Володимир Михайлович,

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри систем штучного інтелекту та телекомунікаційних технологій
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0002-3682-7435

У статті розглянуто наукові основи вдосконалення кулачкових механізмів, що є складовою частиною газорозподільних систем транспортних енергетичних установок. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності газообміну, зниження паливних витрат і зменшення негативного впливу на довкілля під час експлуатації транспортних засобів. Основну увагу приділено побудові цілісної теоретичної моделі оптимізації, яка враховує кінематичні, динамічні, конструкційні, технологічні та ресурсні чинники. Як ключовий критерій, що оцінює ефективність функціонування кулачкових механізмів газорозподілу, вибрано величину «час – переріз», яка зумовлена діаграмою зміни прохідних перерізів клапанів за часом. Зазначено, що остання, своєю чергою, формується з урахуванням конструктивних особливостей впускних і випускних клапанів, каналів у кришці циліндра енергетичних установок і задається профілем кулачка діаграми зміни підйомів штовхача. Тому як показник для оцінки «час – переріз» клапанів доцільно застосовувати коефіцієнт повноти діаграми підйомів штовхача, який тісно пов'язаний з якістю функціонування системи газорозподілу. Для реалізації поставлених завдань застосовано методи комп'ютерного моделювання та математичного планування експерименту, що дало змогу зменшити обсяг розрахунків і водночас зберегти високу точність результатів. Запропоновано алгоритм багато-параметричної оптимізації з урахуванням множинних обмежень, що дає змогу забезпечити збалансовану роботу механізму з урахуванням умов ресурсозбереження та автоматизації проєктування. Отримані результати доцільно впроваджувати в сучасні транспортні технології з метою підвищення енергоефективності та довговічності енергетичних установок. Представлений підхід є основою для подальших досліджень і практичного впровадження в галузі проєктування транспортних систем нового покоління.

Ключові слова: транспорт, енергетичні установки, транспортні технології, ресурсозбереження, експлуатація, автоматизація, комп'ютерне моделювання, математичне планування.

Fomin Oleksiy, Lohvinenko Oleksandr, Sagin Sergii, Bursuk Oleksandr, Muraviov Volodymyr.
Theoretical principles of cam mechanisms optimization in transport power plants

The article considers the scientific foundations of improving cam mechanisms, which are an integral part of gas distribution systems of transport power plants. The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency of gas exchange, reduce fuel consumption and reduce the negative impact on the environment during the operation of vehicles. The main attention is paid to building a holistic theoretical optimization model that considers kinematic, dynamic, structural, technological and resource factors. As a key criterion for assessing the efficiency of the functioning of cam mechanisms of gas distribution, the value of "time-section" was chosen, which is determined by the diagram of changes in the passage sections of the valves over time. It is noted that as an indicator for assessing the "time-section" of valves, it is advisable to use the coefficient of completeness of the pusher lift diagram, which is closely related to the quality of the functioning of the gas distribution system. To implement the tasks, computer modeling and mathematical planning of the experiment methods were used, which made it possible to reduce the volume of calculations and at the same time maintain high accuracy of the results. A multiparameter optimization algorithm was proposed considering multiple constraints, which allows to ensure balanced operation of the mechanism considering the conditions of resource conservation and design automation. The results obtained should be implemented in modern transport technologies to increase energy efficiency and durability of power plants. The presented approach is the basis for further research and practical implementation in the field of designing new generation transport systems.

Keywords: transport, power plants, transport technologies, resource saving, operation, automation, computer modeling, mathematical planning.

Вступ. Ефективність та надійність транспортних енергетичних установок (ТЕУ) значною мірою залежать від оптимальної роботи їхніх механізмів газорозподілу, основою яких є кулачкові механізми. Однак існуючі підходи до їх проектування та розрахунку часто базуються на спрощених моделях, які не враховують всієї складності реальних умов експлуатації. Це призводить до виникнення небажаних вібрацій, підвищеного зносу деталей та зниження загальної ефективності системи. Водночас недостатня увага приділяється комплексному аналізу динамічних навантажень, які виникають у процесі роботи механізмів.

Також актуальною є проблема мінімізації енергетичних утрат, що безпосередньо впливає на паливну економічність транспортних засобів. Сучасні вимоги до екологічності вимагають зменшення викидів шкідливих речовин, що також пов'язано з оптимізацією процесів газообміну в енергетичних установках, де кулачкові механізми відіграють ключову роль. Відсутність універсальних методик оптимізації, які б ураховували одночасно кінематичні, динамічні та ресурсні характеристики, є значною перешкодою для подальшого розвитку. Існуючі методики часто є фрагментарними і не дають змоги досягти глобального оптимуму. Таким чином, виникає потреба у розробленні інтегрованих теоретичних засад оптимізації, які дадуть змогу підвищити функціональні характеристики кулачкових механізмів у транспортних енергетичних установках.

У статті [1] авторами запропоновано геометричну оптимізацію елементів інноваційної конструкції електромеханічного гальмівного приводу (основою якого є кулачковий механізм)

для підвищення ефективності та зниження енергоспоживання.

Автори роботи [2] запропонували математичну модель процесу термічної правки елементів металоконструкцій вагонів. Результати проведених розрахунків дають змогу вдосконалити технології відновлення геометрії вагонних рам.

У роботі [3] порівнюються прямий та зворотний методи проектування кулачкових механізмів. Результати показують переваги прямих методів за складних кінематичних задач. Дослідження корисне для оптимізації механізмів із кулачковими з'єднаннями.

У публікації [4] розглянуто концепцію бортових ємнісних накопичувачів енергії для метрополітену. Автори запропонували аналітичну модель визначення основних параметрів накопичувача. Отримані результати демонструють потенціал для зниження енергоспоживання рухомого складу.

У роботі [5] досліджуються раціональні параметри накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Запропоновано багатфакторний підхід до оцінки ефективності системи з урахуванням масогабаритних характеристик. Стаття орієнтована на практичне впровадження в транспортній галузі.

У статті [6] запропоновано підхід до оптимального проектування плоских рамних конструкцій із використанням підкріплювального навчання. Алгоритм дає змогу знаходити ефективну конфігурацію з урахуванням статичних навантажень. Дослідження містить приклади реалізації на практичних задачах машинобудування.

У роботі [7] досліджено можливість використання штучного інтелекту для автоматизації інженерного проектування. Описано архітектуру

системи, здатної адаптуватися до нових умов проектування. Стаття є внеском у розвиток цифрових інженерних платформ.

Автори дослідження [8] проаналізували існуючі та перспективні профілі конструктивних елементів несучих систем рухомого складу. Проведено порівняльну оцінку міцнісних і масових характеристик профілів. Визначено перспективні напрями вдосконалення вагонних конструкцій. Результати можуть бути використані для підвищення ефективності нових моделей вагонів.

Матеріали дослідження, викладені в роботі [9], висвітлюють методичний підхід до дослідження динаміки механізмів газорозподілу транспортних енергетичних установок. Стаття містить опис динамічних процесів, що відбуваються в елементах приводу. Також досліджено розроблену автором математичну модель, аналіз якої дає змогу отримувати динамічні характеристики і здійснювати контроль умов прийнятної динаміки механізмів газорозподілу.

У роботі [10] запропоновано метод оптимізації режиму запуску поворотного механізму маніпулятора. Проведено експериментальну перевірку зниження енергетичних витрат. Результати демонструють поліпшення керованості механізму.

У статті [11] розроблено математичні моделі зміни технічного стану базових несучих елементів кузовів напіввагонів. Досліджено вплив експлуатаційних чинників на параметри жорсткості та ресурсу. Проведено аналіз деградації конструкції в умовах дії динамічних навантажень.

Автори роботи [12] проаналізували вплив параметрів електропередачі на ефективність роботи вантажного електрорухомого складу, а також представили модель електромеханічного перетворення енергії у системі постійного струму. Було проведено порівняння ефективності для різних схем керування. Дослідження виявило шляхи зменшення витрат у системі тяги.

У роботі [13] досліджено комбіновану механічну систему для маркування овочів за допомогою кулачкового та еліптичного механізмів. Проведено оптимізацію кінематики з урахуванням геометрії продукту. Результати експериментів підтвердили ефективність системи на нерівних поверхнях.

Аналіз літератури засвідчив, що питанням визначення теоретичних засад оптимізації кулачкових механізмів у транспортних енергетичних установках не приділено достатньої уваги. Наявні дослідження часто фокусуються на окремих аспектах, таких як кінематичний або динамічний аналіз, без комплексного підходу до

оптимізації. Бракує робіт, що інтегрують моделювання з експериментальною верифікацією для всебічного розуміння процесів. Також відсутні систематизовані дані щодо впливу різних параметрів на загальну ефективність та довговічність механізмів. Це створює значні прогалини у знаннях, які перешкоджають повноцінному вдосконаленню. Отже, існує нагальна потреба у проведенні цілісного дослідження, спрямованого на розроблення універсальних теоретичних засад оптимізації.

Методи та методики дослідження. Метою науково-прикладного дослідження є розроблення комплексних теоретичних засад оптимізації кулачкових механізмів у транспортних енергетичних установках. Це дасть змогу підвищити їх ефективність, надійність та довговічність за рахунок удосконалення кінематичних та динамічних характеристик. Досягнення цієї мети сприятиме створенню більш досконалих і екологічно чистих транспортних систем та потребує проведення теоретичного аналізу функціонування кулачкових механізмів, застосування методів оптимізаційного проектування, використання методик математичного планування експерименту та математичного моделювання.

Результати. Одним з основних напрямів підвищення паливної економічності та екологічних показників транспортних енергетичних установок є удосконалення робочого процесу за рахунок поліпшення процесів сумішоутворення і згоряння у циліндрах. Водночас істотний вплив на паливну економічність має якість протікання процесів газообміну, що безпосередньо пов'язана з роботою кулачкового механізму газорозподілу (КМГР). Як відомо, загальноприйнятним критерієм, що оцінює ефективність функціонування КМГР, є величина «час – переріз» (ЧП), яка зумовлена діаграмою зміни прохідних перерізів клапанів за часом (чи за кутом обертання колінчастого валу). Остання, своєю чергою, формується з урахуванням конструктивних особливостей впускних і випускних клапанів, каналів у кришці циліндра ТЕУ і задається профілем кулачка діаграми зміни підйомів штовхача. Тому як показник для оцінки ЧП клапанів доцільно застосовувати коефіцієнт повноти діаграми підйомів штовхача (КПДПШ). Також можна відзначити, що зміна КПДШ еквівалентна зміні ЧП та оказує безпосередній вплив на процеси газообміну, що протікають у циліндрах енергетичних установок, і в остаточному підсумку – на величину питомої ефективної витрати палива та показники екології.

На величину ЧП поряд із заданими фазами газорозподілу значною мірою оказує вплив

характер зміни площини прохідного перерізу клапанів, який безпосередньо залежить від заданого закону їх переміщень. Під час визначення ЧП клапанів енергетичних установок ураховується взаємозв'язок зміни площин прохідних перерізів клапанів з їх переміщеннями. При цьому виділяються дві ділянки.

На першій ділянці (від моменту початку підйому клапана до моменту, коли перпендикуляр, відбудований від точки А до конусної поверхні сідла, перетинає точку С (рис. 1)) площа прохідного перерізу визначається за формулою:

$$F_1 = \pi h \cos \alpha \left(d + \frac{h \sin 2\alpha}{2} \right),$$

де h – поточне значення переміщень клапанів;
 d – діаметр меншої основи конуса клапана;
 α – кут нахилу фаски клапана.

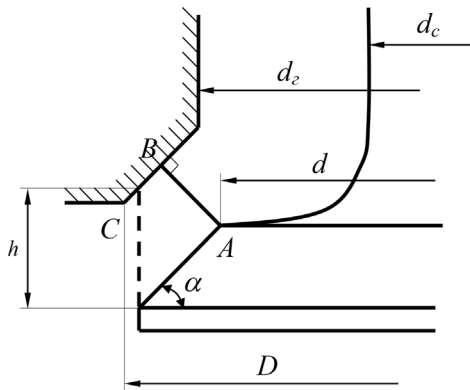


Рис. 1. До розрахунку прохідних перерізів клапанів

Розрахунок площини прохідного перерізу на другій ділянці розпочинається з такої висоти підйому клапана, коли перпендикуляр із точки А, меншої основи конуса клапана, вже не проходить через конус сідла ($AB > AC$). Тоді F визначається за формулою:

$$F_2 = \pi \frac{D+d}{2} \sqrt{\left(\frac{D-d}{2}\right)^2 + \left(h - \frac{D-d}{2} \operatorname{tg} \alpha\right)^2},$$

де D – діаметр великої основи конуса сідла клапана.

Закінчення розрахунку на другій ділянці відповідає рівнянню площин прохідного перерізу F_2 і величини поперечного кільцевого перерізу горловини (з урахуванням площини стержня клапана), який визначається із співвідношень:

$$F = \pi \frac{d_e^2 - d_c^2}{4},$$

де d_e – діаметр горловини;
 d_c – діаметр стержня клапана.

Подальший підйом клапана не призводить до збільшення прохідного перерізу.

Тоді величина «час – переріз» за відомих прохідних перерізів клапанів визначається за формулою:

$$A = \frac{k}{6n} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F d\varphi,$$

де φ_1 і φ_2 – початок підйому і кінець опускання клапана за кутом обертання колінчатого валу;

n – частота обертання колінчатого валу;

F – площа прохідного перерізу;

k – кількість одноіменних клапанів на один циліндр.

Як було зазначено вище оцінним показником «час – переріз» клапанів є коефіцієнт повноти діаграми підйомів штовхача η_n , який визначається за формулою:

$$\eta_n = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_0} S d\varphi / (S_{\max} \varphi_0),$$

де S – поточне значення підйомів штовхача відповідно до куту обертання кулачка φ ;

S_{\max} – найбільше значення величини переміщення штовхача відповідно до максимально заданого підйому клапана (рис. 2);

φ_0 – кут дії кулачка, який визначається необхідною величиною продовження відкриття клапанів.

Відомо, що значення КПДПШ, а також надійність функціонування КМГР остаточно визначаються профілями кулачків приводу впускних і випускних клапанів, які формуються на етапі їх профілювання. Водночас на етапі профілювання кулачків поряд із прагненням отримання максимальних величин ЧП клапанів потрібно враховувати основні вимоги (обмеження), що охоплюють особливості формування профілю, а також умови роботи їхнього привода.

Нижче представлено групи вимог до профілювання кулачків форсованих транспортних енергетичних установок.

Вимоги ефективності – повинно забезпечуватися максимально можливе значення коефіцієнта КПДПШ.

Конструкційні вимоги:

1. Кут дії кулачка повинен відповідати заданим фазам газорозподілу.

2. Найбільший підйом штовхача повинен відповідати найбільшому ходу клапана. При цьому слід прагнути, щоб найбільший хід клапана забезпечував рівність площ максимального прохідного перерізу клапанів і горловини сідла клапана в кришці циліндру.

3. Радіус початкового кола кулачка вибирається конструктивно або за емпіричними

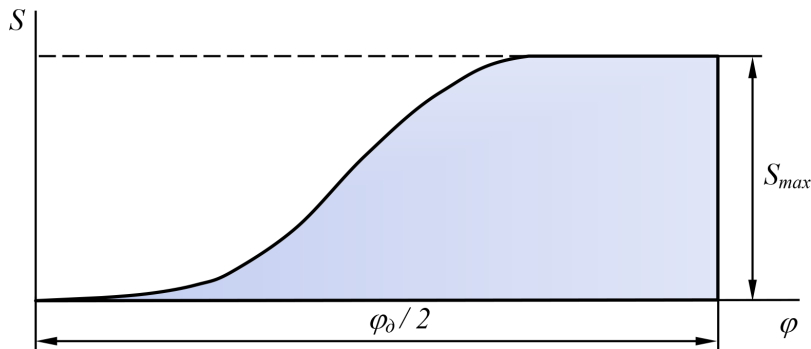


Рис. 2. До обґрунтування критерію ефективності кулачкового механізму привода клапанів

залежностями. При цьому мінімальна величина радіуса початкового кола кулачка повинна забезпечувати виконання вимоги $\beta_{\max} \leq [\beta]$, де β_{\max} , $[\beta]$ – максимальний та припустимий кут тиску в кулачковому механізмі.

4. За необхідності враховується компенсація теплового зазору з боку кулачка (для забезпечення нормальної роботи КМГР).

Умови працездатності механізму:

1. Забезпечення прийнятної рівня максимальних контактних напружень по профілю кулачка $\sigma_{H\max} \leq [\sigma_H]$, де $\sigma_{H\max}$, $[\sigma_H]$ – максимальні та припустимі контактні напруження.

2. Забезпечення прийнятних значень мінімального коефіцієнта запасу стійкості штанги.

3. Мінімальна величина коефіцієнта запасу клапанних пружин за силами інерції. На його величину впливає як рівень найбільших від'ємних прискорень, так і вид кривої, за яким вони змінюються.

Умови технологічності: мінімальний радіус кривизни $R_{кр\min}$ увігнутої частини профілю кулачку не повинен бути менше припустимого значення $[R_{кр}]$, який визначається технологічними можливостями металорізального обладнання. При цьому слід зазначити, що найбільший рівень додатних прискорень найчастіше обмежується саме технологічними умовами.

Умова прийнятної динаміки КМГР: повинна забезпечуватися безрозривна робота кінематичного ланцюга приводу. Під час розгляду цієї умови необхідно виділити складну роль таких параметрів, як найбільші рівні додатних і від'ємних прискорень та довжина ділянки додатних прискорень. Особливу ж увагу має вид кривої, за яким саме змінюються прискорення штовхача.

Таким чином, слід зазначити, що необхідність урахування множини вище наведених показників, які залежать від множини керованих змінних (їх кількість і вид залежать від вибраної методики профілювання кулачків), визначає те, що процес отримання високоефективних кулачків

є оптимізаційним проєктуванням і являє собою рішення задачі багатомірної оптимізації з обмеженнями.

У загальному уявленні раціональне рішення задач оптимізаційного проєктування виконують у такій послідовності:

- визначають границі оптимізації (обмежується сфера пошуку оптимального рішення). Вони задаються межами зміни (інтервалами варіювання) зовнішніх вхідних параметрів;

- виділяються ключові оцінки оптимальності, а саме вибираються критерії оптимальності (формується вектор критеріальних показників Y), на основі значень яких оцінюються різні варіанти та знаходиться «найкращий» із них. При цьому вибір критеріїв базується на одній із двох оцінок оптимальності: економічній оцінці оптимальності (передбачає пошук рішення з умови досягнення найбільшої економічної ефективності). Виражається умовою отримання зумовленого технічного рішення за мінімальних витрат – визначає вибір критеріїв економічного характеру; технічній оцінці оптимальності (передбачає пошук рішення за умови отримання максимального ефекту за обговореними показниками роботи ТЗ за виконання всіх обмежень, що враховуються, – визначає вибір технічних критеріїв, пов'язаних із показниками технічного рівня технічного засобу);

- здійснюється вибір внутрішніх параметрів технічного засобу (формується вектор керованих змінних $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$). При цьому доцільно прагнути до меншої кількості таких змінних (вибирати лише найвпливовіші);

- виконується формування цільової функції (ЦФ) (функції відгуку) виду $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ та математичного запису поставленого оптимізаційного завдання, яке загалом виглядає так: $F(x) \rightarrow extremum, x \in D$ (де D – область оптимізації);

- розробляється математична модель для дослідження ЦФ із використанням

електронно-обчислювальної машини. Вирішується завдання оптимізаційного проектування з урахуванням пошуку оптимального варіанта технічного рішення.

Слід відзначити, що за автоматизованого проектування та конструювання широко застосовують узагальнені математичні моделі (УММ). Одним із перспективних напрямів їх одержання є використання сучасних методів математичного планування експерименту (МПЕ). Ці методи передбачають проведення експериментальних або розрахункових досліджень на основі відповідного математичного плану, який задає визначену мінімальну кількість експериментів або розрахунків.

У методичному плані отримання УММ із використанням методів МПЕ передбачає таку послідовність дій:

- з урахуванням виду об'єкта і мети дослідження визначаються показники y_n , змінні параметри (фактори) q_m і вид УММ – $y_n = f(q_1, q_2, \dots, q_m)$. Установлюються інтервали варіювання факторів, виконується їх нормування;

- залежно від числа факторів q_m і виду УММ вибирається (із довідника з МПЕ) відповідна матриця планування і складається математичний план проведення дослідження, який задає необхідні значення факторів q_m .

- відповідно до математичного плану проводиться експериментальне або розрахункове дослідження, формуються масиви отриманих показників y_n ;

- на основі відповідних масивів показників y_n визначаються параметри (коефіцієнти) УММ виду $y_n = f(q_1, q_2, \dots, q_m)$;

- перевіряється (за необхідності забезпечується) адекватність отриманих УММ та оцінюється значимість їхніх коефіцієнтів.

Під час вибору змінних факторів слід урахувати, що згідно з математичним планом одночасно змінюються числові значення декількох факторів. Тому вибрані фактори повинні відповідати таким основним вимогам: *сумісності* – усі комбінації значень факторів, які задаються за планом, повинні бути здійсненими і безпечними; *незалежності* – повинна забезпечуватися можливість установлення заданого значення фактору незалежно від значень інших факторів; *відсутності лінійної кореляції* (взаємозв'язків) між факторами.

Для універсального запису математичних планів (матриць планування) вводяться нормовані значення факторів x :

$$x = \frac{q - q_n}{\Delta q},$$

де q_n – початковий (нульовий) рівень змінної q ,

$$q_n = \frac{q_{\min} + q_{\max}}{2},$$

де q_{\min} , q_{\max} – відповідно мінімальне та максимальне значення змінної q (границі заданого інтервалу варіювання),

Δq – крок варіювання змінної q ,

$$\Delta q = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{k},$$

де k – число цілих ділянок, на які розбитий інтервал варіювання змінної q . Найчастіше $k = 2$, тобто змінні варіюються на трьох рівнях.

Перехід до нормованих факторів x_m забезпечує простий зв'язок з їхніми дійсними значеннями q_m , що дає змогу складати математичний план, маючи відповідну матрицю планування (табл. 1).

Таблиця 1

Дійсні значення фактору q_m	$q_{m_{\min}}$	q_{m_n}	$q_{m_{\max}}$
Відповідні нормовані значення x_m	-1	0	+1

Найбільше поширення у практиці отримання УММ для проектування технічних засобів отримали ортогональні математичні плани другого порядку, використання яких передбачає одержання УММ у вигляді поліномів другого ступеня:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i q_i + \sum_{i=1}^m a_{ii} q_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i < j)}}^m a_{ij} q_i q_j.$$

З урахуванням того, що теорія МПЕ базується на методах математичної статистики, під час проведення експериментальних досліджень необхідно здійснювати рандомізацію експериментів, які задаються планом, – встановлювати випадкову черговість проведення експериментів за планом.

У загальній постановці метою оптимізаційного проектування є визначення вектору керування параметрів об'єкта проектування $X^*(x_1, x_2, \dots, x_n)$, який називається оптимальною точкою і задовольняє усім заданим обмеженням, за яких досягається екстремальне значення цільової функції (ЦФ) $F^*(x)$ – значення ЦФ в оптимальній точці.

Основна складність постановки таких задач оптимізації полягає у початковій багатокритеріальності об'єкта проектування (мається векторний характер критеріїв оптимальності), тобто складності формування ЦФ. Оскільки ЦФ повинна описувати зміну лише одного критерію оптимальності, необхідно виконувати згортання векторного критерію, тобто звести

багатокритеріальну задачу до однокритеріальної. У загальному плані це зводиться до виділення під час проєктування з множини критеріїв одного, який найбільш повно відбиває ефективність об'єкта – основного критерію оптимальності (первинного, головного). І тоді ЦФ надається у вигляді $F(x)$ – залежності основного критерію від керованих змінних. Інші ж критерії розглядаються як вторинні і надаються у вигляді функціональних обмежень (залежних від керованих змінних), а керовані змінні розглядаються як параметричні (прямі) обмеження.

Параметричні обмеження відбивають інтервали варіювання змінних (наприклад, $x_{ia} \leq x_i \leq x_{ib}$, $i \in [1; n]$, де x_{ia} , x_{ib} – відповідно мінімальне і максимальне значення параметру x_i) і визначають область оптимізації (область можливих рішень) без урахування функціональних обмежень.

Функціональні обмеження описують зміну та вимоги до вторинних критеріїв і можуть представитися у вигляді рівнянь ($\psi(x) = k$) або ($\alpha(x) > 0$), формуючи в області можливих рішень область D_x – область припустимих рішень, у якій і відшукується прийнятне рішення.

У загальному записі область D_x може бути представлена у вигляді

$$D_x = \left\{ X \mid \psi(x)=k, \alpha(x)=0, x_{ia} \leq x_i \leq x_{ib}, i \in [1; n] \right\}.$$

Тоді загальний запис задачі багатомірної оптимізації:

$$F(x) \rightarrow \text{extremum}, \quad x \in D_x \in D.$$

Стосовно задачі оптимізаційного проєктування високоефективних кулачкових механізмів приводу клапанів як критеріального показника доцільно розглядати коефіцієнт повноти діаграми підйомів штовхача η_n . Тоді всі інші показники, що належать до інших груп вимог на проєктування (а саме β_{\max} , $\sigma_{H\max}$, $R_{kp\min}$) будуть ураховуватися як функціональні обмеження.

Тоді область припустимих рішень:

$$D_x = \left\{ X \mid \beta_{\max} \leq [\beta], R_{kp\min} \geq [R_{kp}], \sigma_{H\max} \leq [\sigma_H], \dots, x_{ia} \leq x_i \leq x_{ib}, i \in [1; n] \right\}.$$

Цільова функція:

$$\eta_n(x) \rightarrow \max, \quad x \in D_x \in D.$$

Наведене математичне описання характеризує суттєву складність досліджень із вибору оптимальних значень основних параметрів базового закону прискорень штовхача, які б задовольняли всім умовам на проєктування КМПК. У зв'язку із цим доцільним під час проєктування КМПК є обґрунтована фіксація низки параметрів базового закону з подальшим визначенням оптимальних величин змінних параметрів, яку необхідно проводити окремо для ділянок додатних і від'ємних прискорень.

Висновки. У статті обґрунтовано теоретичні засади оптимізації кулачкових механізмів транспортних енергетичних установок. Запропоновано інтегрований підхід до проєктування, що враховує кінематичні, динамічні, конструкційні та ресурсні вимоги. Визначено, що ключовим критерієм ефективності механізмів газорозподілу є коефіцієнт повноти діаграми підйомів штовхача, який безпосередньо впливає на процеси газообміну та паливну економічність. Оптимізаційне проєктування профілю кулачка запропоновано здійснювати з урахуванням обмежень за умовами динаміки, технологічності та працездатності. Рекомендовано застосування методів математичного планування експерименту для побудови узагальнених моделей і пошуку оптимальних параметрів. Теоретичні засади оптимізації, розроблені в рамках дослідження, створюють основу для подальших наукових розробок у галузі машинобудування. Результати дослідження можуть бути використані для розроблення нового покоління транспортних енергетичних установок із підвищеною ефективністю та надійністю.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Yan Z., Chen X., Yan M., Hang P. Design and Optimization of a Novel Electronic Mechanical Brake Actuator Based on Cam. *Actuators*, 2023. Vol. 12, Iss. 8. 329.
2. Математичне описання термічної правки вагонних металокопункцій / О. В. Фомін та ін. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29(68). № 1. Ч. 3. С. 151–155.
3. Pozo Palacios J., Fulbright N. J., Voth J. A. F., Van de Ven J. D. Comparison of forward and inverse cam generation methods for the design of cam linkage mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 2023. Vol. 190. 105465.
4. Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2018. Issue 5 (1). P. 79–87.

5. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2018. Vol. 2. No. 1(92). P. 63–71.
6. Hayashi K., Ohsaki M. Reinforcement learning for optimum design of a plane frame under static loads. *Engineering with Computers*, 2021. Vol. 37. P. 1999–2011.
7. Dworschak F., Dietze S., Wittmann M., Schleich B., Wartzack S. Reinforcement learning for engineering design automation. *Advanced Engineering Informatics*, 2022. Vol. 52. 101612.
8. Фомін О. В., Логвіненко О. А., Бурлуцький О. В., Фоміна А. М. Аналіз існуючих та перспективних профілів складових елементів несучих систем одиниць рухомого складу залізниць. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія «Динаміка та міцність машин». 2016. Т. 1. № 46. С. 66–72.
9. Логвіненко О. А. Особливості методичного підходу до дослідження динаміки механізму газорозподілу транспортних енергетичних установок. *SWorldJournal*. Svishtov, Bulgaria, 2024. Issue 24. Part 1. P. 144–150.
10. Loveikin V., Romasevych Yu., Zloto T., Lyashko A., Diachenko O. Optimization of start up power mode of rotation mechanism of manipulator crane with a cylindrical articulated load suspension. *Machinery & Energetics*. 2022. Т. 13, № 1. P. 11–17.
11. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів напіввагонів / О.В. Фомін та ін. *Залізничний транспорт України*. 2013. № 5/6(102/103). С. 95–104.
12. Gorobchenko O., Fomin O., Fomin V., Kovalenko V. Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current. , 2018. Vol. 1, No. 3 (91). P. 60–67.
13. Zhang L., Zhou H., Chen J., Tong J., Liu Y., Zhang X. Optimization design and experiment of cam elliptical gear combined vegetables curved surface labeling mechanism. *Frontiers in Robotics and AI*, 2024. Vol. 11. 1431078.

REFERENCES:

1. Yan, Z., Chen, X., Yan, M., & Hang, P. (2023). Design and Optimization of a Novel Electronic Mechanical Brake Actuator Based on Cam. *Actuators*. Vol. 12, Iss. 8. 329.
2. Fomin, O. V., Horbunov, M. I., Lohvinenko, O. A., Burlutskiy, O. V., & Fomina, A. M. (2018). Matematychnе opysannia termichnoi pravky vahonnykh metalokonstruktсии [Mathematical description of thermal straightening of railcar metal structures.]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific notes of the V. I. Vernadsky Tavrichesky National University. Series: Technical Sciences*. Kyiv. 29 (68), № 1(3). 151–155. [in Ukrainian].
3. Pozo Palacios, J., Fulbright, N. J., Voth, J. A. F., & Van de Ven, J. D. (2023). Comparison of forward and inverse cam generation methods for the design of cam linkage mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*. Vol. 190. 105465.
4. Sulim, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., & Mastepan, A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. Issue 5(1). P. 79–87.
5. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., & Ishchenko V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. Vol. 2. No. 1(92). P. 63–71.
6. Hayashi, K., & Ohsaki, M. (2021). Reinforcement learning for optimum design of a plane frame under static loads. *Engineering with Computers*. Vol. 37. P. 1999–2011.
7. Dworschak, F., Dietze, S., Wittmann, M., Schleich, B., & Wartzack, S. (2022). Reinforcement learning for engineering design automation. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 52. 101612.
8. Fomin, O. V., Lohvinenko, O. A., Burlutskiy, O. V., & Fomina, A. M. (2016). Analiz isnuuiuchykh ta perspektyvnykh profiliv skladovykh elementiv nesuchykh system odynyts rukhomoho skladu zaliznyts [Analysis of existing and prospective profiles of component elements of load-bearing systems of railway rolling stock units.]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Serii: Dynamika ta mitsnist mashyn – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines*. Kharkiv. 1(46). 66–72. [in Ukrainian].
9. Lohvinenko, O. A. (2024). Osoblyvosti metodychnoho pidkhodu do doslidzhennia dynamiky mekhanizmu hazorozpodilu transportnykh enerhetychnykh ustanovok [Peculiarities of the methodological approach to studying the dynamics of the gas distribution mechanism of transport power plants]. *SWorldJournal*. Svishtov, Bulgaria. 24(1). 144–150. [in Ukrainian].

10. Loveikin, V., Romasevych, Yu., Zloto, T., Lyashko, A., & Diachenko, O. (2022). Optimization of start up power mode of rotation mechanism of manipulator crane with a cylindrical articulated load suspension. *Machinery & Energetics*. Т. 13, № 1, P. 11–17.
11. Fomin, O. V., Lohvinenko, O. A., Domin, R. Iu., Borodai, H. P., Fomin, V. V., & Burlutskyi, O. V. (2013). Matematychni modeli zminy osnovnykh pokaznykh bazovykh nesuchykh elementiv kuzoviv napivvahoniv [Mathematical models of changes in the main indicators of the basic load-bearing elements of gondola bodies]. *Naukovo-praktychnyi zhurnal "Zaliznychnyi transport Ukrainy" – Scientific and practical journal "Railway Transport of Ukraine"*. Kyiv. 5/6(102/103). 95–104. [in Ukrainian].
12. Gorobchenko, O., Fomin, O., Fomin, V., & Kovalenko, V. (2018). Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. Vol. 1, No. 3(91). P. 60–67.
13. Zhang, L., Zhou, H., Chen, J., Tong, J., Liu, Y., & Zhang, X. (2024). Optimization design and experiment of cam elliptical gear combined vegetables curved surface labeling mechanism. *Frontiers in Robotics and AI*. Vol. 11. 1431078.