

АВТОТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ

УДК 621.8:623.4

DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2020.47.0.15

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАНЕТАРНОЇ ПЕРЕДАЧІ БОРТОВОГО РЕДУКТОРА
З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ЕВОЛЮЦІЇКлітної В. В.¹, Клітної В. В.¹, Батрак П. О.¹¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. На основі проведеного аналізу наукових публікацій з багатоцільової оптимізації планетарних передач для завдання модернізації конструкції бортової коробки передач з великою кількістю змінних конструкції та умов обмеження вибрано алгоритм оптимізації, побудований на базі алгоритму диференціальної еволюції. Здійснено оптимізацію планетарної передачі бортового редуктора танка Т-64 з використанням алгоритму методу диференціальної еволюції. Використання отриманої конструкції планетарної передачі дозволяє знизити навантаження на елементи коробки передач та зберегти габаритні розміри й конструктивні особливості бортового редуктора.

Ключові слова: планетарна передача, оптимізація, алгоритм диференціальної еволюції.

Вступ

Модернізація бойових машин, пов'язана зі встановленням додаткового обладнання, вимагає використання більш потужних двигунів, що призводить до збільшення навантажень на деталі та вузли бортової коробки передач. Дослідження демонструють, що в сучасних умовах бортова коробка передач танка Т-64 працює на межі своїх технічних можливостей: збільшення потужності двигуна до 1200 к.с. знижує ресурс підшипникових опорів і зубчастих передач [1].

Проблема підвищення ресурсу підшипникових опорів може бути вирішена завдяки використанню спеціальних пружних опорів [2]. Конструкцію бортової коробки передач можна поліпшити насамперед внаслідок оптимізації планетарного редуктора.

Аналіз публікацій

Синтез зубчастих планетарних передач – проблема, яка досліджувалася багатьма науковцями. У літературі аналізувалось застосування аналітичних та обчислювальних методів для синтезу планетарних передач із 70-х років минулого століття.

Зазвичай необхідно одночасно вирішити декілька задач оптимізації для досягнення поставленої мети, оскільки планетарні передачі за своїм типом визначаються кількісними параметрами, які можуть одночасно вимагати максимізації та мінімізації [3].

Так, в наступних роботах вирішувалось

завдання багатокритеріальної оптимізації планетарних передач.

У роботі [4] здійснювалася оптимізація планетарного редуктора за допомогою аналізу навантажень на сателіти та центральні колеса, а також визначалися оптимальні умови навантаження для ефективної роботи редуктора без збоїв та передчасних ремонтів.

Синтез кількості зубців автоматичної планетарної коробки передач було досліджено в роботі [5] за допомогою алгоритму оцінювання розподілу.

У роботі [6] отримана оптимальна компактна конструкція планетарної передачі з великим передаточним числом, великою вантажоздатністю та високою ефективністю з використанням методу нечіткої багатоцільової оптимізації та запропонована універсальна математична модель методу.

У роботі [7] було здійснено оптимізацію триступінчастої планетарної коробки передач завдяки зменшенню габаритів, щоб зробити конструкцію більш компактною. Оптимізацію було проведено аналітично та з використанням кількісного аналізу за допомогою програмного забезпечення Power Gear. Результати демонструють, що оптимізована планетарна коробка передач відповідає всім умовам, які висувались.

Для вирішення проблеми оптимального синтезу запропонована велика кількість оптимальних алгоритмів. Проблема може бути вирішена за допомогою детермінованих або

стохастичних методів. Однак детерміновані методи містять припущення щодо безперервності та диференційованості цільової функції. Таким чином, за допомогою стохастичних алгоритмів можна ефективно вирішити проблему оптимального синтезу планетарних передач.

Серед стохастичних методів оптимізації найчастіше застосовують методи, які використовують закономірності і принципи, запозичені у самої природи, наприклад методи ройового інтелекту та еволюційної оптимізації.

Одним із методів ройового інтелекту є алгоритм рою частинок, який забезпечує стохастичну оптимізацію на основі популяції. Він був використаний у роботі [8], на його основі була встановлена оптимальна конструктивна математична модель планетарного редуктора. Ця математична модель з вісьмома змінними конструкції та вісімнадцятьма умовами обмеження нерівності є складним завданням оптимального синтезу. Результати моделювання демонструють, що за допомогою алгоритму рою частинок значно зменшено вагу планетарного редуктора, покращено якість конструкції та її ефективність.

Альтернативою вирішення проблеми оптимального синтезу планетарних передач є використання еволюційних алгоритмів, які розроблені здебільшого як необмежені методи оптимізації.

Генетичний алгоритм, який належить до еволюційних алгоритмів і заснований на принципі природного еволюційного відбору, та його велика кількість версій користуються популярністю в наукових колах та в промисловості (зокрема проблема оптимізації планетарних редукторів [9]) завдяки своїй інтуїтивності, простоті в реалізації та здатності ефективно вирішувати оптимізаційні проблеми, характерні для складних інженерних систем.

У роботі [10] було здійснено оптимальний синтез композитного планетарного редуктора, під час якого максимальна навантажувальна здатність редуктора визначалась як цільова функція. Для досягнення результатів використовувався генетичний алгоритм, що є еволюційним алгоритмом пошуку, який використовується для вирішення завдань оптимізації і моделювання за допомогою послідовного добирання, комбінування і варіації параметрів, які необхідно знайти, з використанням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію. У процесі роботи була значно

покращена продуктивність редуктора.

Мета дослідження [11] полягала в створенні оптимальної конструкції планетарної передачі з прямозубими колесами за допомогою використання генетичного алгоритму. Під час роботи була запропонована глобальна оптимізація геометричних параметрів епіциклічної системи зубчастих коліс (модуль, кількість зубців, ширина зуба та діаметра вала) для отримання малої ваги, міжосьової відстані та максимальної ефективності.

У роботі [12] з використанням генетичного алгоритму була вирішена проблема оптимізації планетарного редуктора. Завданням дослідження була мінімізація всієї маси редуктора. Оптимальне вирішення, отримане після оптимізації, порівнювалося з традиційним дизайном.

Іншими еволюційними алгоритмами є алгоритми диференціальної еволюції, які теж використовуються для вирішення проблеми оптимального синтезу планетарної передачі.

Оптимізована конструкція планетарного редуктора, тобто конструкція з мінімізованим обсягом відповідно до заданих навантажень, умов роботи та матеріалу, та алгоритм оптимізації, побудований на базі стандартного алгоритму диференціальної еволюції і запрограмований з використанням мови програмування visual basic 6.0, подані в роботі [13]. Отримані результати програми відповідають реальним вимогам.

У роботі [14] було отримано оптимальну конструктивну математичну модель двоступінчастого планетарного редуктора з використанням теорії алгоритму диференціальної еволюції. У цій моделі було враховано дев'ять змінних параметрів конструкції та шістнадцять умов обмеження.

Під час аналізу для вирішення завдання оптимізації планетарного редуктора ефективним є використання стохастичних методів оптимізації. Найбільш оптимальним вибором для завдання з великою кількістю змінних конструкції та умов обмеження є алгоритм оптимізації, побудований на базі еволюційних алгоритмів, тобто алгоритмів диференціальної еволюції.

Контактно-втомне викришування зубців центральних коліс (сонячної та епіциклічної шестерні) є однією із найпоширеніших причин виходу із ладу важконавантажених планетарних передач. Під час експериментів було доведено, що в перевантажених планетарних передачах контактна міцність поверхні зубців центральних коліс завжди менша,

ніж розрахункова, а процес викришування зубців відбувається першим [10].

Відповідно до вищезазначеного, максимальна вантажопідйомність як оптимальна цільова функція за умови збереження міжосьової відстані або розмірів планетарної передачі бортового редуктора Т-64 є найбільш перспективною.

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є збільшення навантажувальної здатності, а отже, й підвищення ресурсу роботи елементів бортової коробки передач танка Т-64 через вирішення завдання оптимізації бортового планетарного редуктора.

Для досягнення поставленої мети необхідно здійснити аналіз проблеми синтезу зубчастих планетарних передач, запропонувати математичну модель і алгоритм багаточільової оптимізації планетарних передач, дослідити параметри планетарної передачі на оптимальність за обґрунтованими критеріями.

Визначення цільової функції та змінних параметрів оптимізації

Згідно з геометричними параметрами бортового редуктора (рис.1) знайдемо оптимальне рішення (оптимальні конструктивні параметри передачі – кількість зубців, величини модулів тощо) щодо кінематичної схеми планетарної передачі бортового редуктора, параметрів вхідного вала, загальної передаточного числа передачі, яке одночасно забезпечує основну цільову функцію, тобто максимальну вантажопідйомність, та відповідає необхідним габаритним умовам.

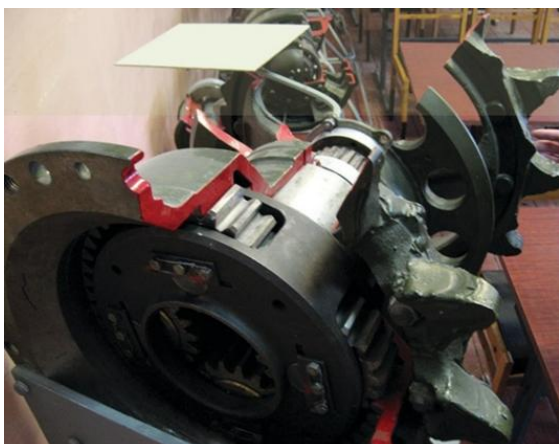


Рис. 1. Бортовий редуктор

Вектор змінних параметрів оптимізації визначимо у такий спосіб:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}^T = \{z_1, m, b, u\}^T, \quad (1)$$

де z_1 – кількість зубців сонячної шестерні;

m – модуль зачеплення;

b – ширина вінця;

u – передаточне співвідношення.

Як цільову функцію визначасмо максимальну навантажувальну здатність передачі залежно від контактних напружень у вигляді потужності на вхідному валу (кВт):

$$P = \frac{n_1 \cdot b \cdot m^2 \cdot z_1^2 \cdot u}{9550 \cdot (u + 1)} \times \frac{\sigma_{Hlim}^2 \cdot (Z_R \cdot Z_v)^2}{2 \cdot S_H^2 \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{HV} \cdot (Z_H \cdot Z_M \cdot Z_\epsilon)}, \quad (2)$$

де n_1 – оберти вхідного вала передачі;

σ_{Hlim} – межа контактної витривалості зубців;

Z_R – коефіцієнт, що враховує шорсткість поверхонь зубців;

Z_v – коефіцієнт, що враховує колову швидкість;

S_H – коефіцієнт безпеки;

$K_{H\alpha}$ – коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження між зубцями;

$K_{H\beta}$ – коефіцієнт нерівномірності навантаження по ширині зубчастих вінців;

K_{HV} – коефіцієнт динамічного навантаження;

Z_H – коефіцієнт форми спряжених поверхонь зубців;

Z_M – коефіцієнт, що враховує механічні властивості матеріалів зубчастих коліс;

Z_ϵ – коефіцієнт сумарної довжини контактної лінії.

Оскільки вся потужність передається через дві бортові передачі, які розташовані вздовж двох бортів корми машини, то максимальна потужність на одну передачу за умови використання двигуна серії 6-ТД може скласти приблизно 650 кВт. Найбільше силове навантаження передача відчуває під час крутих поворотів танка вгору, отже, у цьому випадку оберти вхідного вала передачі за максимального навантаження можуть дорівнювати 100 – 200 об/хв, залежно від передачі.

Як матеріал зубчастих коліс використовуємо леговану низьковуглецеву сталь 18ХМНА, що добре себе зарекомендувала в бортових планетарних передачах. Вибір цієї

марки сталі або близьких до неї за хіміко-механічними ознаками цілком виправданий щодо виготовлення важконавантажених та важливих передач. Ці сталі забезпечують високу стійкість до зношення завдяки великій твердості поверхні та в'язкості серцевини.

Визначення умов обмеження

Зазначена математична модель оптимального проектування планетарної передачі з використанням методу диференціальної еволюції потребує введення системи обмежень, які накладаються на конфігурації змінних параметрів.

Відповідно до механічних принципів, кількість зубців епіциклічної та сонячної шестерень повинна відповідати рівнянню

$$u = \frac{z_3}{z_1} + 1. \quad (3)$$

Сума зубців епіциклічної та сонячної шестерень повинна бути кратною кількості сателітів:

$$\frac{z_1 + z_3}{3(4)} = \text{int}. \quad (4)$$

Паралельність між осями вхідного та вихідного валів становить

$$\frac{z_1 + z_2}{\cos(\alpha)} = \frac{z_3 - z_2}{\cos(\alpha)}, \quad (5)$$

де z_2 – кількість зубців сателіта;

α – кут зачеплення.

Умова сумісності:

$$d_{a2} \leq 2 \cdot a_{12} \cdot \sin(60), \quad (6)$$

де d_{a2} – діаметр вершин сателіта;

a_{12} – міжосьова відстань між сонячною шестернею і сателітом.

Діапазон величин ширини зуба:

$$0,6 \cdot z_1 \leq \frac{b}{m} \leq 1,3 \cdot z_1. \quad (7)$$

Умова міцності на згин зубців за умови дії циклічного навантаження:

$$\sigma_F = Y_F \cdot Y_\beta \cdot \frac{2 \cdot T_1 \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{Fv}}{m \cdot d_1 \cdot b} \leq [\sigma_F], \quad (8)$$

де T_1 – обертовий момент на сонячній шестерні;

d_1 – дільний діаметр сонячної шестерні;

Y_F – коефіцієнт форми зубців;

Y_β – коефіцієнт нахилу зубців;

$K_{F\alpha}$ – коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження між зубцями в процесі згинання;

$K_{F\beta}$ – коефіцієнт нерівномірності навантаження за шириною зубчастих вінців під час згинання;

K_{Fv} – коефіцієнт динамічного навантаження в процесі згинання;

$[\sigma_F]$ – допускні напруження на згинання.

Умова міцності на контакт за умови дії циклічного навантаження:

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_M \cdot Z_\varepsilon \times \sqrt{\frac{2 \cdot T_1 \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{Hv}}{b \cdot d_1^2} \cdot \frac{u+1}{u}} \leq [\sigma_H], \quad (9)$$

де $[\sigma_H]$ – допускні контактні напруження.

Алгоритм оптимізації та отримані результати

Наступним етапом вирішення завдання багатоцільової оптимізації планетарної передачі з використанням методу диференціальної еволюції є розроблення алгоритму оптимального проектування (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема алгоритму оптимізації

Метод диференціальної еволюції – це один з еволюційних методів, який дозволяє отримати точні розв'язки задач оптимізації. Він складається з трьох основних етапів:

генерування популяції (достатньо великої) з індивідами в m -мірному просторі, випадковим чином розподілених вздовж всього домену розглянутих функцій; аналіз індивідів як сформованої сукупності через знаходження цільової функції; заміна поточної популяції на більш придатну нову та повторення цієї заміни до отримання задовільних результатів або доти, доки отримані задані критерії припинення.

Алгоритм побудований за модульним принципом і містить основну програму і підпрограму.

За розробленою методикою багатокритеріальної оптимізації бортового редуктора досліджені параметри планетарної передачі на оптимальність за критеріями максимальної навантажувальної здатності та мінімальних габаритних розмірів.

Відповідно до результатів оптимізації необхідно використовувати планетарну передачу з чотирма сателітами. За цих умов розраховані такі геометричні параметри передачі: кількість зубців сонячної шестерні $z_1 = 13$; кількість зубів сателіта $z_2 = 23$; $z_3 = 59$ – кількість зубів епіциклу; модуль зачеплення $m = 7$ мм; ширина зубчастого вінця $b = 85$ мм.

За таких умов максимальні радіальні розміри передачі відповідають розмірам базового редуктора. Ширина зубчастого вінця є більшою, ніж базова, але конструкція корпусу редуктора дозволяє розмістити запропоновану передачу.

Передаточне число бортової планетарної передачі дорівнює
$$u = 1 + \frac{z_3}{z_1} = 1 + \frac{59}{13} = 5,54,$$

що є вищим, ніж передаточне число базового бортового редуктора, яке дорівнює 5,454, що дозволяє розвантажити елементи бортової коробки передач танка в процесі роботи на максимальних щодо навантаження режимах.

Висновки

У сучасних умовах бортова коробка передач танка Т-64 працює на межі своїх технічних можливостей. Для збереження цих переваг й усунення зазначених недоліків конструкція бортової передачі потребує модернізації.

Здійснено літературний аналіз наявних методів багатоцільової оптимізації планетарних передач. Найбільш оптимальним вибором для завдання з великою кількістю змінних конструкцій та великою кількістю умов обмеження є алгоритм оптимізації, побудований на базі еволюційних алгоритмів.

Здійснено оптимізацію планетарної пере-

дачі бортового редуктора танка Т-64 з використанням алгоритму методу диференціальної еволюції. Використання отриманої конструкції планетарної передачі дозволяє знизити навантаження на елементи коробки передач за умови збереження габаритних розмірів і конструктивних особливостей бортового редуктора.

Запропонований підхід до оптимізації планетарних передач може бути використаний для проектування сучасних зразків планетарних редукторів.

Література (References)

1. Chernyshev V. L., Ostapchuk Y. A., Shipulin A. A. Issledovanie dinamiki silovoy peredachi tanka T-64A v rezhimakh razgona i tormozheniya na suhoi gruntovoy doroge [Study of the dynamics of the transmission of the T-64A tank in the modes of acceleration and braking on a dry dirt road.] Visnik NTU «HPI». 2013. № 41 (1014). P. 162–173.
2. Klitnoi V., Gaydamaka A. On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness. Diagnostyka. 2020. 21(2). P. 69–75.
3. Edmund S. Maputi, Rajesh Arora Design optimization of a three-stage transmission using advanced optimization techniques. Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 2019. 10. A8. P. 1–11.
4. Design, load analysis and optimization of compound epicyclic gear trains / Dilawer S., Abdul Md., Junaidi R., Mehdi S. American journal of engineering research. 2013. 02. P. 146–153.
5. Simionescu P. A., Beale D. G., Dozier G. V. Teeth-number synthesis of an automatic planetary transmission using evolutionary computation. Proceedings of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Vol 2: 28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B. Salt Lake City. Utah. USA. September 28 – October 2. 2004. P. 291–298.
6. Epicyclic gear train parametric design based on the multi-objective fuzzy optimization method / Zhang N., Cao Y., Du J., Li Q. Advances in Computer Science Research. 2016. Vol 64. P. 73–79.
7. Design and numerical analysis of optimized planetary gear box / Nandepagoudar S. B., Shaikh S. N., Gote S. R., More S. P. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2017. Vol. 17. P. 05–11.
8. Qimin X., Qili X. Study on optimal design of planetary gear reducer based on particle swarm algorithm and matlab. Sixth International Conference on Semantics, Knowledge and Grids. Beijing, 2010. P. 391–394.
9. Rahmani T., Rao Y.V.D. Synthesis and analysis

- of planetary gear trains using genetic algorithm. 2014 3rd International Conference on Eco-friendly Computing and Communication Systems, Mangalore. 2014. P. 293–294.
10. Wu J. B., Shu L., Cheng H. M. The optimal design of multi-level planetary gear reducer. *Advanced Materials Research*. Vol. 139–141. Trans Tech Publications. Oct. 2010. P. 1308–1311.
 11. Daoudi K., Boudi E.M., Abdellah M. Genetic approach for multiobjective optimization of epicyclic gear train. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. P.1–10.
 12. Buiga O. A 2K-h single-row planetary gearbox optimal design with genetic algorithms. *Advanced Engineering Forum*. Vol. 8–9. Trans Tech Publications. June 2013. P. 389–396.
 13. Wang, Z. K., Zheng, Y. L. The program and optimal design of planetary gear based on differential evolution algorithm. *Advanced Materials Research*. Vol. 482–484. Trans Tech Publications. Feb. 2012. P. 2438–2441.
 14. Chen T., Zhang Z., Chen D., Li Y. The optimization of two-stage planetary gear train based on mathematica. *Pervasive computing and the networked world. ICPA/SWS 2012. Lecture notes in computer science*. 2013. Vol. 7719. P. 122–136.

Клітної Віктор Володимирович¹, к.т.н., проф. каф. деталей машин та мехатронних систем, тел. +38057-707-61-28, Viktor.Klitnoi@khpi.edu.ua,

Клітної Володимир Вікторович¹, к.т.н., доц. каф. деталей машин та мехатронних систем, тел. +38 067-282-93-24, Vladklitnoi@gmail.com,

Батрак Пилип Олександрович¹, студент, тел. +38 067-203-34-87, filipp.batrak.fb@gmail.com.

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, м. Харків, 261002, Україна.

Оптимизация планетарной передачи бортового редуктора с использованием метода дифференциальной эволюции

Аннотация. В ходе проведенного анализа научных публикаций по многоцелевой оптимизации планетарных передач для задачи модернизации конструкции бортовой коробки передач с большим количеством переменных конструкции и большим количеством условий ограничения выбран алгоритм оптимизации, построенный на базе алгоритма дифференциальной эволюции. Выполнена оптимизация планетарной передачи бортового редуктора танка Т-64 с использованием алгоритма метода дифференциальной эволюции. Использование полученной конструкции планетарной передачи позволяет снизить нагрузку на элементы коробки передач и при этом сохранить габаритные размеры и конструктивные особенности бортового редуктора.

Ключевые слова: планетарная передача, оптимизация, алгоритм дифференциальной эволюции.

Клітної Віктор Володимирович¹, к.т.н., проф.

каф. деталей машин и мехатронных систем, тел. +38057-707-61-28, Viktor.Klitnoi@khpi.edu.ua,

Клітної Володимир Вікторович¹, к.т.н., доц. каф. деталей машин и мехатронных систем, тел. +38 067-282-93-24, Vladklitnoi@gmail.com,

Батрак Филипп Александрович¹, студент, тел. +38 067-203-34-87, filipp.batrak.fb@gmail.com.

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, г. Харьков, 61002, Украина.

Optimization of planetary gear of onboard gearbox using the method of differential evolution

Abstract. Problem. Further modernization of combat vehicles, associated with the installation of additional equipment, requires the use of more powerful engines, which leads to increased loads on parts and components of the onboard gearbox. In modern conditions, the onboard gearbox of the T-64 tank works at the limit of its technical capabilities. To maintain the existing advantages and eliminate these shortcomings, the design of the onboard planetary gearbox needs to be upgraded. **Goal.** The goal is to increase the load capacity and as a consequence to increase the service life of the elements of the onboard gearbox by carrying out optimization of the onboard planetary gearbox. **Methodology.** Methods for calculating planetary mechanisms and methods for analyzing the strength of gears were used to build a mathematical model. When constructing the optimal design algorithm, the method of differential evolution was used. **Results.** The literature review of the existing methods of multicriteria optimization of planetary gears has been made. According to the developed method of optimization of the onboard gearbox, a study of the parameters of planetary gear for optimality according to the criteria of maximum load capacity and minimum dimensions has been made. **Originality.** An algorithm for optimal design using the method of differential evolution for optimization of planetary gearboxes has been developed. **Practical value.** The use of the received design of a planetary gear reduce loading on elements of a transmission of the T-64 tank, thus the overall dimensions and design features of an onboard gearbox remain. The proposed approach to optimization of planetary gears can be used in the design of modern models of planetary gearboxes.

Key words: planetary gear, optimization, differential evolution algorithm.

Klitnoy Viktor¹, Ph.D., professor, Department of Machine Components and Mechatronic Systems, tel. +38057-707-61-28, Viktor.Klitnoi@khpi.edu.ua,

Klitnoi Volodymyr¹, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Machine Components and Mechatronic Systems, tel. +38 067-282-93-24, Vladklitnoi@gmail.com,

Batrak Philip¹, student, tel. +38 067-203-34-87, filipp.batrak.fb@gmail.com.

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.