

УДК 621.833.65

В. О. МАЛАЩЕНКО, О. Р. СТРИЛЕЦЬ, В. М. СТРИЛЕЦЬ

**К.К.Д. ЗУБЧАСТОЇ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ У ПРИСТРОЇ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ЗМІНАМИ ШВИДКОСТІ ЧЕРЕЗ ВОДИЛО**

Розглянуто коефіцієнт корисної дії зубчастої диференціальної передачі у пристрої для керування змінами швидкості, коли ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а веденою епіцикл або навпаки. Керуючою ланкою є водило, яке може обертатись або буде зупинене за допомогою замкнутої гідросистеми. Виконано теоретичне дослідження коефіцієнта корисної дії для такої передачі і за допомогою комп'ютерного моделювання отримані графічні залежності його від її параметрів. Отримані аналітичні та графічні залежності к.к.д. між ведучою і веденою ланками (сонячним зубчастим колесом і епіциклом, або навпаки) в односходникових однорядних і двохрядних зубчастих диференціальних передачах з замкнутими гідросистемами за допомогою засобів комп'ютерного моделювання, дозволяють переконатися про зміну значення к.к.д. і оцінити його з точки зору самогальмування.

**Ключові слова:** коефіцієнт корисної дії, зубчаста диференціальна передача, сонячне зубчасте колесо, водило, епіцикл, сателіт, замкнута гідросистема.

Рассмотрен коэффициент полезного действия зубчатой дифференциальной передачи в устройстве для управления изменения скорости, когда ведущим звеном есть солнечное зубчатое колесо, а ведомым эцикл или наоборот. Звеном управления есть водило, которое может вращаться или быть остановлено при помощи замкнутой гидросистемы. Выполнено теоретическое исследование коэффициента полезного действия для такой передачи и с помощью компьютерного моделирования получены графические зависимости его от её параметров. Получены аналитические и графические зависимости к. п. д. между ведущим и ведомым звеньями (солнечным зубчатым колесом и эциклом или на оборот) в одноступенчатых однорядных и двухрядных зубчатых дифференциальных передачах с замкнутыми гидросистемами при помощи компьютерного моделирования позволяют удостовериться об изменении к. п. д. и оценить его с точки зрения самотормозения.

**Ключевые слова:** коэффициент полезного действия, зубчатая дифференциальная передача, солнечное зубчатое колесо, водило, эцикл, сателлит, замкнутая гидросистема.

The article considers the efficiency coefficient of epicyclic gear train in the speed changes management device when the driving element is a sun gear and the driven – is ring gear or vice versa. The control element is the carrier that can be rotated or stopped by closed circuit hydrosystem. We have conducted a theoretical computer research of efficiency coefficient in such epicyclic gear train and using the means of computer modeling we have obtained graphical dependences of the transmission efficiency from its parameters. Computer modeled analytical and graphical dependences that have been obtained for efficiency coefficient between driving and driven elements (sun gear to ring gear or vice versa) in a single-row or two-row epicyclic gear trains with closed circuit hydrosystems allow to verify visually the change of efficiency value and evaluating it in terms of self-braking.

**Keywords:** efficiency coefficient, epicyclic gear train, sun gear, carrier, ring gear, satellite, hydrosystem.

**Вступ. Постановка проблеми.** При виконанні робіт машинами в різних галузях промисловості, виникає необхідність керування змінами швидкості за величиною та напрямком її виконавчих механізмів. У вітчизняній [1–8] і зарубіжній [9–12] періодичній технічній літературі запропонований новий безсходниковий спосіб керування змінами швидкості за допомогою односходникових і багатосходникових зубчастих диференціальних передач з замкнутою гідросистемою. При виступах на наукових конференціях та інших наукових дискусіях, наприклад [13–21], часто звертається увага на коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) таких пристроїв, які дозволяють керувати змінами швидкості за допомогою односходникових і багатосходникових зубчастих диференціальних передач з замкнутою гідросистемою, розроблених на рівні патентів України [22–25] і потребують подальших теоретичних досліджень їх кінематичних, силових і геометричних параметрів. Про к.к.д. механізмів, широко описано у відомій класичній технічній літературі з теорії механізмів і машин і новітній, наприклад, [26].

**Мета роботи.** Виконати теоретично-комп'ютерне дослідження к.к.д. для однорядної та двохрядної зубчастої диференціальної передачі з внутрішнім і зовнішнім зачепленнями зубчастих коліс, яка входить до складу пристрою зміни швидкості через водило, коли ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, веденою – епіцикл, або навпаки та на його даних оцінити роботу передачі з точки зору самогальмування.

**Виклад основного матеріалу.** Для всіх механізмів досліджені, в якійсь мір, к.к.д., відомі із літературних джерел, наприклад, [26] і практики. За к.к.д. оцінюють досконалість машини або механізму (коли к.к.д. ви-

щий). Коефіцієнт корисної дії лежить у межах  $0 \leq \eta < 1$  і є величиною, яка визначається відношенням роботи корисних сил  $A_{kc}$  до повної роботи  $A_n$

$$\eta = A_{kc} / A_n. \quad (1)$$

Повна робота складається з роботи корисних сил  $A_{kc}$  і роботи шкідливих сил  $A_{uc}$

$$A_n = A_{kc} + A_{uc}. \quad (2)$$

Вказане вище загальне визначення к.к.д. може бути конкретизовано для окремих випадків і, що важливо, можна отримати формули для визначення к.к.д. через інші параметри механізмів.

Визначення к.к.д. зубчастих диференціальних передач не завжди необхідне. Якщо зубчаста диференціальна передача застосовується в якості редуктора, який передає потужність виконавчому механізму машини на протязі тривалого часу, тоді для в'яснення її придатності необхідно визначити к.к.д. У випадках, коли епіциклічні передачі використовують у якості пристроїв регулювання руху деяких ланок к.к.д. можна не визначати, якщо є впевненість, що передача не самогальмує.

На практиці в основному застосовують три методи визначення к.к.д. [26]:

– безпосереднє визначення втрат на тертя у всіх рухомих з'єднаннях ланок на сили які діють між ними і по швидкостях відносного руху. При цьому сили визначають попередньо без врахування тертя, а з них вже визначають сили тертя та їх роботу. Отримана робота сил тертя дозволяє визначити к.к.д.;

– зубчасті диференціальні передачі шляхом інверсії зводять до простих передач з нерухомими осями, покладаючи, що додаткове обертання, подане всьому механі-

зму в цілому, в результаті перетворення нічого не міняє у роботі сил тертя. Не враховуються також додаткові втрати від тиску в кінематичних перах, які виникають під дією відцентрових сил і моментів сил інерції сателітів;

– при визначенні к.к.д. передбачають, що втрати на тертя в кожній парі зубчастих коліс передачі пропорційно-нальній добутку колової сили на зубцях і швидкості точки початкового кола сателіта по відношенню до водила, або добутку обертального моменту на кутову швидкість. Цей добуток носить назву потенціальної потужності.

К.к.д пристрою для керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі з замкнутою гідросистемою через епіцикл, де ведучою ланкою є водило, а веденою сонячне зубчасте колесо, записується у вигляді

$$\eta = \eta_{13}\eta_6\eta_7, \quad (3)$$

де  $\eta_{13}$  – к.к.д зубчастої диференціальної передачі;  
 $\eta_6$  – к.к.д привода замкнутої гідросистеми (зубчастої передачі);  
 $\eta_7$  – к.к.д замкнутої гідросистеми (втрати потужності на роботу насоса).

Блок-схема можливих втрат потужності в пристрої для керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі з замкнутою гідросистемою через водило, де ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо 1, а веденою епіцикл, наведена на рис. 1.

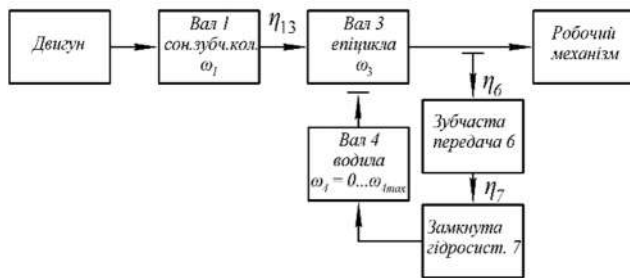


Рис. 1 – Блок-схема втрат потужності у пристрої для керування змінами швидкості коли ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, веденою – епіцикл, а керування виконується через водило

При визначенні к.к.д. за першим і третім методами необхідно знати колової сили, діючі у кожному зубчастому зачепленні зубчастої диференціальної передачі.

Для визначення к.к.д. розглянемо схему сил, які діють у зачепленнях сонячного зубчастого колеса і сателіта  $\bar{F}_{12}$ , сателіта та епіцикла  $\bar{F}_{23}$  і сателіта та водила  $\bar{F}_{24}$  і запишемо умову рівноваги сателіта (рис. 2) у вигляді

$$\bar{F}_{12} + \bar{F}_{23} + \bar{F}_{24} = 0. \quad (4)$$

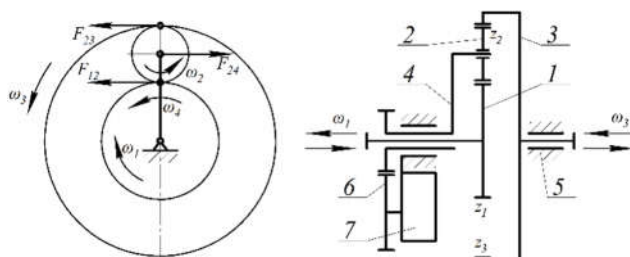


Рис. 2 – Схеми сил в однорядній зубчастій диференціальній передачі

Крім того, сума моментів сил, які діють на сателіт, відносно осі його обертання, рівна нулю:

$$\bar{F}_{12}r_2 + \bar{F}_{23}r_2 = 0, \quad (5)$$

де  $r_2$  – радіус початкового кола сателіта, з числом зубців  $z_2$ .

З виразів (4) і (5) сили, діючі на ланки диференціальної передачі будуть:

$$\bar{F}_{12} = -\bar{F}_{23}; \quad (6) \quad \bar{F}_{24} = -(\bar{F}_{12} + \bar{F}_{23}). \quad (7)$$

Якщо заданий обертальний момент  $T_1$ , то

$$F_{12} = T_1 / r_1, \quad (8)$$

де  $r_1$  – радіус початкового кола сонячного зубчастого колеса  $z_1$ .

Обертальний моменту, який прикладається до колеса  $z_3$  у передачі з зупиненим водилом, маємо

$$T_3 = F_{23}r_3 = -\frac{r_3}{r_1}T_1 = -u_{13}^{(4)}T_1, \quad (9)$$

тобто обертальні моменти  $T_1$  і  $T_3$  без врахування тертя, відносяться, як у зубчастій передачі з нерухомими осями. Враховуючи тертя на зубцях, зв'язок між обертальними моментами можна подати так

$$T_3 = -T_1 u_{13}^{(4)} \eta_{13}^k, \quad (10)$$

де  $\eta_{13}$  – к.к.д. передачі з нерухомими осями, визначається як для послідовного зачеплення;  
 $k = +1$  – коли передача потужності здійснюється від зубчастого колеса  $z_1$  до зубчастого колеса  $z_3$  і  $k = -1$  – коли передача потужності здійснюється від зубчастого колеса  $z_3$  до зубчастого колеса  $z_1$ ;  
 $u_{13}^{(4)} = -z_3 / z_1$  – передаточне число зубчастої диференціальної передачі при зупиненому водилі.

Зв'язок між обертальними моментами водила 4 і зубчастого колеса  $z_1$  можна подати таким чином, [26]:

$$T_4 = -T_1(1 - u_{13} \eta_{13}^k). \quad (11)$$

Зв'язок між обертальними моментами, які діють на ланки зубчастої диференціальної передачі, може бути встановлений із розгляду умови рівноваги всієї передачі в цілому. При цьому отримаємо

$$T_1 + T_3 + T_4 = 0, \quad (12)$$

Якщо обертальний момент  $T_1$  ведучий, а  $T_3$  – ведений і  $T_4$  – керуючий, тоді к.к.д. при ведучому сонячному зубчастому колесі  $z_1$  можна виразити відношення корисно використаної потужності до повної потужності

$$\eta_{13} = -\frac{T_3 \omega_3}{T_1 \omega_1 + T_4 \omega_4}. \quad (13)$$

Підставимо значення  $T_1$ ,  $T_3$  і  $T_4$  у (13) і виразимо  $\omega_3$  через  $\omega_1$  використавши формулу (2), [9], після нескладних перетворень, отримаємо:

$$\eta_{13} = \frac{[\omega_1 - \omega_4(1 + u_{13}^{(4)})]\eta_{13}^{(4)}}{\omega_1 - \omega_4(1 + u_{13}\eta_{13}^{(4)})}. \quad (14)$$

Для того, щоб більш наочно показати характер зміни к.к.д. диференціальної передачі з пристроєм у вигляді замкнутої гідросистеми коли ведучою ланкою є

сонячне зубчасте колесо, а веденою – епіцикл, від параметрів передачі, виконано наступне. Формула (14) запрограмована та отримані на комп'ютері графічні залежності  $\eta_{13} = f(\omega_1, \omega_4, u_{13}^{(4)})$  для передаточних відношень, що змінювались у межах  $u_{13}^{(4)} = 1...20$ , та кутовій швидкості ведучої ланки  $\omega_1 = 100$  рад/с. Отримані графічні залежності для:  $\eta_{13}^{(4)} = 0,97$  і  $\omega_4 = 0...25$  рад/с наведені на рис. 3.

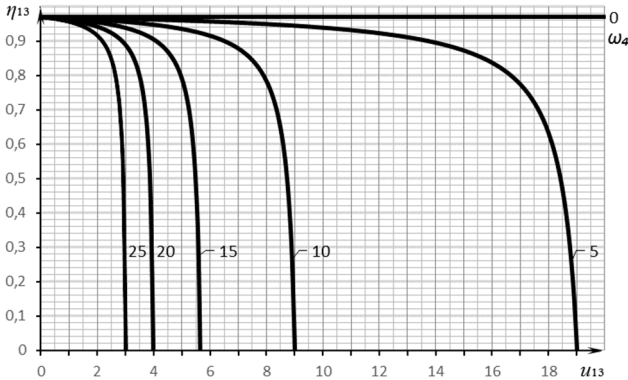


Рис. 3 – Графіки зміни к.к.д у диференціальній однорядній передачі коли ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а веденою – водило

К.к.д пристрою для керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі з замкнутою гідросистемою через водило, де ведучою ланкою є епіцикл, а веденою сонячне зубчасте колесо, записується у вигляді

$$\eta = \eta_{31} \eta_6 \eta_7, \quad (15)$$

де  $\eta_{31}$  – к.к.д диференціальної передачі;  
 $\eta_6$  – к.к.д привода замкнутої гідросистеми (зубчаста передача);  
 $\eta_7$  – к.к.д замкнутої гідросистеми (втрати потужності на роботу насоса при перекачуванні рідини у замкнутій гідросистемі).

Блок-схема можливих втрат потужності в пристрої для керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі з замкнутою гідросистемою через водило, де ведучою ланкою є епіцикл 3, а веденою сонячне зубчасте колесо 1, наведена на рис. 4.

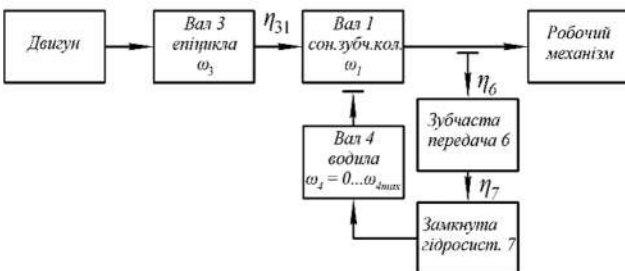


Рис. 4 – Блок-схема втрат потужності у пристрої для керування змінами швидкості коли ведучою ланкою є епіцикл, а веденою – сонячне зубчасте колесо

Якщо обертальний момент  $T_1$  є моментом опору робочої машини – сонячне зубчасте колесо є веденим, а  $T_3$  – обертальний момент ведучого епіцикла і  $T_4$  обертальний момент ланки керування – водила, тоді коефіцієнт корисної дії при веденому сонячному зубчастому колесі  $z_1$  можна виразити відношенням корисно використаної потужності до повної потужності

$$\eta_{31} = -\frac{T_1 \omega_1}{T_3 \omega_3 + T_4 \omega_4}. \quad (16)$$

Якщо у формулу (15) підставити значення  $T_1$ ,  $T_3 = -T_1 u_{13}^{(4)} \eta_{13}^{-1}$  і  $T_4 = -T_1 (1 - u_{13}^{(4)} \eta_{13}^{-1})$  з формул (10) і (11) та замінимо  $\omega_1$  через  $\omega_3$  використавши формулу (3) з [9], після нескладних перетворень, отримаємо вираз для к.к.д. при веденому зубчастому колесі  $z_1$  у вигляді

$$\eta_{31} = \frac{[\omega_3 u_{13}^{(4)} - \omega_4 (1 + u_{13}^{(4)})] \eta_{13}^{(4)}}{\omega_3 u_{13}^{(4)} - \omega_4 (\eta_{13} + u_{13}^{(4)})}. \quad (17)$$

Подібно до попереднього отримано графічні зображення виразу (17) для:  $\eta_{13}^{(4)} = 0,97$ ;  $\omega_1 = 100$  рад/с;  $\omega_4 = 0...25$  рад/с і  $u_{13}^{(4)} = 0,1...1$ , що наведені на рис. 5.

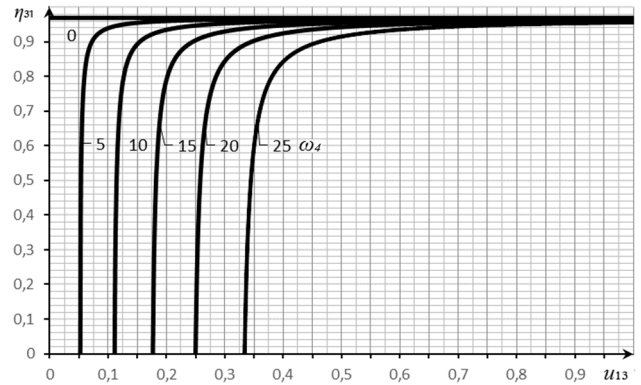


Рис. 5 – Графіки зміни к.к.д у диференціальній однорядній передачі коли ведучою ланкою є епіцикл, а веденою – сонячне зубчасте колесо

На рис. 6 показана схема двохрядної зубчастої диференціальної передачі.

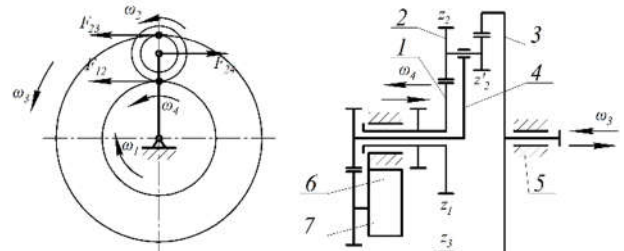


Рис. 6 – Схеми сил у двохрядній зубчастій диференціальній передачі

Для двохрядної зубчастої диференціальної передачі, показаної на рис. 6, висновки будуть подібними і відрізняються лише значенням передаточного числа  $u_{13}^{(4)}$ , яке дорівнює:

$$u_{13}^{(4)} = -\frac{z_2 z_3}{z_1 z_2'} \quad (18)$$

Крім того, сума моментів сил, які діють на сателіт, відносно осі його обертання, рівна нулю:

$$\bar{F}_{12} r_2 + \bar{F}_{23} r_2' = 0, \quad (19)$$

де  $r_2$  і  $r_2'$  – радіуси початкових кіл зубчастих коліс сателіта, відповідно з числом зубців  $z_2$  і  $z_2'$ .

**Висновки:**

1. Отримані за допомогою засобів комп'ютерного моделювання аналітичні та графічні залежності к.к.д

між ведучою і веденою ланками (сонячним зубчастим колесом і епіциклом, або навпаки) у однорядних зубчастих диференціальних передачах з замкнутими гідросистемами, подані на рис. 3 і 5, наочно дозволяють переконатися про зміну значення к.к.д і оцінити його з точки зору самогальмування.

2. Із графіків (рис. 3) видно, що у зубчастій диференціальній передачі де ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а веденою – епіцикл, для різних  $u_{13}^{(4)} = 1...20$  і  $\omega_4 = 0...25$  рад/с, к.к.д зменшується до нуля, що підтверджує самогальмування, тому застосування такої передачі для вказаних меж передаточного числа обмежено залежності від кутової швидкості ланки керування.

3. Із графіків (рис. 5) видно, що у зубчастій диференціальній передачі де ведучою ланкою є епіцикл, а веденою – сонячне зубчасте колесо, у даному квадранті при малих передаточних числах  $u_{13}^{(4)} = 0,1...0,4$  і кутових швидкостях ланки керування  $\omega_4 = 0...25$  рад/с спостерігається самогальмування, а далі к.к.д різко збільшується зі збільшенням передаточного числа, вирівнюється до  $\eta_{13}^{(4)}$  і майже не залежить від кутової швидкості ланки керування та неможливе самогальмування.

#### Список літератури

1. Стрілець О. Керування змінами швидкості за допомогою зубчастої диференціальної передачі / О. Стрілець, В. Стрілець, І. Шинкаренко // "Машинознавство". Всеукраїнський наук.-техн. і виробн. журнал. – № 6 (120), 2007. – С. 38–41.
2. Стрілець О. Комп'ютерне моделювання диференціальних передач з пристроєм для керування швидкістю / О. Стрілець // "Машинознавство". Всеукраїнський наук.-техн. і виробн. журнал. – № 12 (150), 2009. – С. 39–43.
3. Malashchenko V. Fundamentals of Creation of New Devices for Speed Chang Management / V. Malashchenko, O. Strilets, V. Strilets // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – Lviv : LPNU, 2015. – № 2. – р. 11–20.
4. Малащенко В. О. Класифікація способів і пристроїв керування процесом зміни швидкості у техніці / В. О. Малащенко, О. П. Стрілець, В. М. Стрілець // Підйомно-транспортна техніка. – Одеса : 2015. – № 1. – С. 70–78.
5. Стрілець О. П. Обґрунтування можливості керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач / О. Стрілець // Вісник Інженерної академії України. – Київ : НАУ, 2015. – № 2. – С. 177–181.
6. Стрілець О. П. Керування змінами швидкості за допомогою зубчастої диференціальної передачі через епіцикл / О. П. Стрілець // Науковий журнал "Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя". – № 4 (80). – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 129–135.
7. Стрілець О. П. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через сонячне зубчасте колесо / О. П. Стрілець // Науковий журнал "Вісник Хмельницького національного університету". – № 5. – 2015. – С. 68–72.
8. Стрілець О. П. Керування змінами швидкості за допомогою неповної диференціальної передачі через сателіт / О. П. Стрілець // Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки. – Рівне : 2015. – № 4 (72). – С. 138–148.
9. Стрілець О. П. Керування змінами швидкості за допомогою зубчастої диференціальної передачі через водило / О. П. Стрілець // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – № 6 (95), ч. 1. – 2015. – С. 87–92.
10. Малащенко В. О. Керування змінами швидкості за допомогою багатосходинової зубчастої передачі через сонячне зубчасте колесо / В. О. Малащенко, О. П. Стрілець, В. М. Стрілець // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 87–92.
11. Малащенко В. О. Керування змінами швидкості за допомогою багатосходинової зубчастої передачі через сонячне зубчасте колесо / В. О. Малащенко, О. П. Стрілець, В. М. Стрілець // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів : НУ "ЛПІ", 2016. – № 838. – С. 58–63.

12. Малащенко В. О. Новий привод з диференціалом і замкнутою гідросистемою для керування швидкістю машини / В. О. Малащенко, О. П. Стрілець, В. М. Стрілець // Вінницький науково-технічний журнал "Вібрації в техніці та технологіях". – Вінниця : ВНТУ, 2016. – № 3 (83). – С. 109–116.
13. Malashchenko V. Metoda i urzadzenie do zmiany predkosci za pomoca obiegowej przekladni zebatej z zestawem stopniowanych kol planetarnich / PRACE NAUKOWE ITVL // V. Malashchenko, O. Strilets, V. Strilets. – Zeszit 38, 2016. – s. 5–11.
14. Malashchenko V. Method and device for speed change by the epicyclic gear train with stepped-planet gear set / V. Malashchenko, O. Strilets, V. Strilets // RESEARCH WORKS OF AFIT, Issue 38, 2016 – p. 13–19.
15. Малащенко В. А. Новый способ бесступенчатого изменения скорости при помощи зубчатых дифференциальных передач с замкнутой гидросистемой / В. А. Малащенко, О. П. Стрілець, В. Н. Стрілець // Международный инженерный журнал "Механические передачи. Приводы и компоненты машин". – М. : 2015. – № 4–5. – С. 7–10.
16. Вавилов А. В. Совершенствование трансмиссий дорожных машин для повышения их конкурентоспособности и импортозамещения / А. В. Вавилов, В. А. Малащенко, О. П. Стрілець, В. Н. Стрілець // Автомобильные дороги и мосты. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 140–150.
17. Стрілець О. П. Способи керування змінами швидкості у техніці / О. П. Стрілець // Збірник тез VIII Міжнародної н-п конференції "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси" ПРТК-2015. – Київ : 18–19 травня, 2015. – С. 220–221.
18. Стрілець О. П. Огляд і аналіз способів керування змінами швидкості у техніці / О. П. Стрілець // 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: тези. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2015. – С. 196–197.
19. Стрілець О. П. Кінематичні можливості зубчастих диференціальних передач з замкнутою гідросистемою / О. П. Стрілець // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і студентів "Актуальні задачі сучасних технологій", том 1. – Тернопіль, 25–26 листопада 2015 року. – С. 234–235.
20. Стрілець О. П. Можливості багатосходинової зубчастої диференціальної передачі з замкнутими гідросистемами керувати швидкістю / О. П. Стрілець // Збірник тез. IX Міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси" ПРТК-2016. – Київ : 17–18 травня, 2016. – С. 234–236.
21. Стрілець О. П. Про визначення коефіцієнта корисної дії зубчастих диференціальних передач з замкнутою гідросистемою для керування змінами швидкості / О. П. Стрілець // 5 Міжнародна науково-технічна конференція "Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій": тези – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2016. – С. 142–144.
22. Пат. 18587 Україна, МПК F16 H3/00. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості / Стрілець О. П., Стрілець В. М. ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у №2006605205 ; опубл. 15.11.06, Бюл. № 11.
23. Пат. 25335 Україна, МПК F16 H1/28. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості / Стрілець О. П. ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 200504847 ; заявл. 23.01.07; опубл. 19.08.07, Бюл. № 12.
24. Пат. 28489 Україна, МПК B60K17/06. Планетарна коробка передач / Стрілець О. П. ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у №200709132; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20.
25. Пат. 108239 Україна, МПК F16 H1/28. Пристрій для керування змінами швидкості / Стрілець О. П., Малащенко В. О., Стрілець В. М. ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у №201600131 ; опубл. 11.07.16, Бюл. № 13.
26. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин: Підруч. / Я. Т. Кіницький, НАН України. – К. : Наук. думка, 2002. – 660 с.

#### References (transliterated)

1. Strilets O., Strilets V., Shynkarenko I. Keruvannya zminamy shvydkosti za dopomohoy zubchastoyi dyferentsial'noyi peredachi [Speed changes management by the planetary gear train]. "Mashynoznavstvo". Vseukrainskyi naukovy-tekhnichnyi i vyrobnychy zhurnal. 2007, no. 6 (120), pp. 38–41.
2. Strilets O. Kompiuterne modelivannya dyferentsialnykh peredach z prystroiem dlya keruvannya shvydkisty [Computer modeling of planetary gear trains with the device for speed management]. "Mashynoznavstvo". Vseukrainskyi naukovy-tekhnichnyi i vyrobnychy zhurnal. 2009, no. 12 (150), pp. 39–43.
3. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Fundamentals of Creation of New Devices for Speed Change Management. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. Lviv : LPNU Publ., 2015., no. 2, pp. 11–20.
4. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Klyasyfikatsiya sposobiv i prystroyiv keruvannya protsesom zminy shvydkosti u tekhnitsi

- [Classification of methods and devices for speed change process management in engineering]. *Pidyomno-transportna tekhnika* [Hoisting and transportation machines]. Odesa Publ., 2015, no. 1, pp. 70–78.
5. Strilets O. R. Obgruntuvannya mozhlivosti keruvannya zminamy shvydkosti za dopomohoyu dyferentsial'nykh peredach [Justification of the possibility of speed change management by the planetary gear train]. *Visnyk inzhenernoyi akademiyi Ukrainy* [Herald of the engineering academy of Ukraine]. Kyiv : NAU. Publ., 2015, no. 2, pp. 177–181.
  6. Strilets O. R. Keruvannya zminamy shvydkosti za dopomohoyu zubchastoyi dyferentsial'noyi peredachi cherez epitsykl [Speed changes management by the planetary gear train via ring gear]. *Naukovyy zhurnal "Visnyk Ternopil's'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Puliyua"* [Scientific journal "Herald of the Ternopil National Technical University by Ivan Puliyua"]. Ternopil : TNTU Publ., 2015, no. 4 (80), pp. 129–135.
  7. Strilets O. R. Keruvannya protsesom zminy shvydkosti za dopomohoyu dyferentsial'noyi peredachi cherez sonyachne zubchaste koleso [Speed changes process management by the planetary gear train via sun gear]. *Naukovyy zhurnal "Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu"* [Scientific journal "Herald of the Khmelnytsky National University"]. Khmelnytsky, KhNU Publ., 2015, no. 5, pp. 68–72.
  8. Strilets O. R. Keruvannya zminamy shvydkosti za dopomohoyu nepovnoyi dyferentsial'noyi peredachi cherez satelit [Speed changes management by the planetary gear train via satellite]. *Visnyk natsional'noho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya. Tekhnichni nauky* [Herald of the National University of Water and Environmental Engineering. Technical Sciences]. Rivne : NUWEE Publ., 2015, no. 4 (72), pp. 138–148.
  9. Strilets O. R. Keruvannya zminamy shvydkosti za dopomohoyu zubchastoyi dyferentsial'noyi peredachi cherez vodylo [Speed changes management by the planetary gear train via carrier]. *Visnyk Kremenchut's'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrad's'koho* [Herald of the Kremenchuk Mikhailo Ostrohradsky National University]. Kremenchuk, 2015, no. 6 (95), pp. 87–92.
  10. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Keruvannya zminamy shvydkosti za dopomohoyu bahatoskhodnykovoyi zubchastoyi peredachi cherez sonyachne zubchaste koleso [Speed changes process management by the multistep planetary gear train via sun gear]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Problemy mekhanichnoho pryvodu* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Problems of Mechanical Drive]. Kharkiv : NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 23 (1195), pp. 87–92.
  11. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Keruvannya zminamy shvydkosti za dopomohoyu bahatoskhodnykovoyi zubchastoyi peredachi cherez sonyachne zubchaste koleso [Speed changes process management by the multistep planetary gear train via sun gear]. *Visnyk Natsional'noho universytetu "Lviv's'ka politekhnika". Dynamika, mitsnist' ta proektuvannya mashyn i prykladiv* [Herald of Lviv Polytechnic National University. Dynamics, Strength and Design of Machines and Devices]. Lviv : NU "LP" Publ., 2016, no. 838, pp. 58–63.
  12. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Novyy pryvod z dyferentsialom i zamknotoyu hidrosystemoyu dlya keruvannya shvydkisty mashyny [New drive with planetary gearing and closed circuit hydrosystem for machine speed management]. *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal "Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh"* [Scientific and Technical Journal "Vibration in Engineering and Technology"]. Vinnytsia : VNTU Publ., 2016, no. 83, pp. 109–116.
  13. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Metoda i urzadzenie do zminy predkosti za pomoca obiegovoyi przekladni zebatej z zestawem stopniowanych kol planetarnich. *Prace Naukowe ITVL*, 2016, no. 38, pp. 5–11.
  14. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Method and device for speed change by the epicyclic gear train with stepped-planet gear set. *Research Works of AFIT*, 2016, Issue 38, pp. 13–19.
  15. Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Novyj sposob besstupenchatogo izmeneniya skorosti pri pomoshhi zubchatykh differentsialnykh peredach s zamknotoyu gidrosistemoy [New method of continuously variable speed change by planetary gear train with closed circuit hydrosystem]. *Mezhdunarodnyy inzhenernyy zhurnal "Mekhanicheskie peredachi. Privody i komponenty mashin"* [International engineering journal "Mechanical Transmissions. Drives and Components of Machines"]. Moscow, 2015, no. 4–5, pp. 7–10.
  16. Vavilov A., Malashchenko V., Strilets O., Strilets V. Sovershenstvovanie transmisyi dorozhnykh mashyn dlja povysheniya ih konkurentosposobnosti i importozamesheniya [Improvement of the road machines transmissions to raise its competitiveness and import substitution]. *Avtomobilnye dorogi i mosty* [Automobile roads and bridges]. Minsk, BNTU Publ., 2016, pp. 140–150.
  17. Strilets O. Sposoby keruvannya zminamy shvydkosti u tekhnitsi [Methods of speed changes management in engineering]. *Zbirnyk tez VIII Mizhnarodnoyi n-p konferentsiyi "Intehrovani intelektual'ni roboto-tekhnichni komplekсы"* [Collected Articles of The 8th Int. Science and Tech. Conf. "Integrated Intellectual Robotechnical Complexes"]. Kyiv, NAU Publ., 2015, pp. 220–221.
  18. Strilets O. Ohlyad i analiz sposobiv keruvannya zminamy shvydkosti v tekhnitsi [Overview and analysis of the methods of speed changes management in engineering]. *XII Mizhnarodnoyi sympozium ukrayinskykh inzheneriv-mekhanikov u Lvovi : tezy* [12<sup>th</sup> Int. Symp. of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv : Abstracts]. Lviv, KINPATRI LTD Publ., 2015, pp. 196–197.
  19. Strilets O. Kinematychni mozhlivosti zubchastykh dyferentsial'nykh peredach z zamknotoyu hidrosystemoyu [Kinematics of the planetary gear train with closed circuit hydrosystem]. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh i studentiv "Aktual'ni zadachi suchasnykh tekhnolohiy", T. 1* [Proc. Of Int. Science and Tech. Conf. of Young Scientists and Students "Actual problems of modern technology", Vol. 1]. Ternopil, TNTU Publ., 2015, pp. 234–235.
  20. Strilets O. Mozhlivosti bahatoskhodnykovykh zubchastykh dyferentsial'nykh peredach z zamknotoyu hidrosystemoyu keruvaty shvydkisty [Possibility to manage speed by multistage planetary gear train with closed circuit hydrosystem]. *Zbirnyk tez. IX Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi "Intehrovani intelektual'ni roboto-tekhnichni komplekсы"* [Collected Articles of The 9th Int. Science and Tech. Conf. "Integrated Intellectual Robotechnical Complexes"]. Kyiv, NAU Publ., 2016, pp. 234–236.
  21. Strilets O. Pro vyznachennya koeffitsiyenta korysnoyi diyi zubchastykh dyferentsial'nykh peredach z zamknotoyu hidrosystemoyu dlya keruvannya zminamy shvydkosti [About efficiency determining for planetary gear train with closed circuit hydrosystem for speed changes management]. *V Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya "Teoriya ta praktyka ratsional'noho proektuvannya, vyhotovlennya i ekspluatatsiyi mashynobudivnykh konstruksiy": tezy* [5th Int. Science and Tech. Conf. "Theory and practice of rational design, manufacturing and operation of machine-building constructions": Abstracts]. Lviv, KINPATRI LTD Publ., 2016, pp. 142–144.
  22. Strilets O., Strilets V. Zubchastyy dyferentsial z prystroyem dlya keruvannya zminamy shvydkosti [Planetary gear train with the device for speed changes management]. Patent UA, no. 18587, 2016.
  23. Strilets O. Zubchastyy dyferentsial z prystroyem dlya keruvannya zminamy shvydkosti [Planetary gear train with the device for speed changes management]. Patent UA, no. 25335, 2007.
  24. Strilets O. Planetarna korobka peredach [Planetary gearbox]. Patent UA, no. 28489, 2007.
  25. Strilets O., Malashchenko V., Strilets V. Prystryi dlya keruvannya zminamy shvydkosti [Device for speed changes management]. Patent UA, no. 108239, 2016.
  26. Kinytsky Y. T. *Teoriya mekhanizmiv i mashyn* [Theory of mechanisms and machines]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2002. 660 p.

Надійшла (received) 01.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**К.к.д. зубчатої диференціальної передачі у пристрої для керування змінами швидкості через водило / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 97–102. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2079-0791.**

**К.п.д. зубчатой диференциальной передачи в устройстве для управления скоростью посредством водила / В. А. Малащенко, О. Р. Стрилец, В. Н. Стрелец // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 97–102. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2079-0791.**

**Efficiency of the epicyclic gear train in the device for speed changes management by the carrier / V. O. Malashchenko, O. R. Strilets, V. M. Strilets // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 97–102. – Bibliogr.: 26. – ISSN 2079-0791.**



**Малащенко Володимир Олександрович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", завідувач кафедри технічної механіки і динаміки машин; тел.: (067) 860-45-04; e-mail: v.o.malash@mail.ru.

**Малащенко Владимир Александрович** – доктор технических наук, профессор, Национальный университет "Львовская политехника", заведующий кафедры технической механики и динамики машин; тел.: (067) 860-45-04; e-mail: v.o.malash@mail.ru.

**Malashchenko Volodymyr Oleksandrovych** – Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, National Lviv Polytechnic University, Head of Department of Technical Mechanics And Machine Dynamics; tel.: (067) 860-45-04; e-mail: v.o.malash@mail.ru.

**Стрілець Олег Романович** – кандидат технічних наук, Національний університет водного господарства та природокористування, доцент кафедри теоретичної механіки, інженерної графіки та машинознавства, м. Рівне; тел.: (097) 645-44-13; e-mail: o.r.strilets@nuwm.edu.ua.

**Стрилец Олег Романович** – кандидат технических наук, Национальный университет водного хозяйства та природопользования, доцент кафедры теоретической механики, инженерной графики и машиноведения, г. Ровно; тел.: (097) 645-44-13; e-mail: o.r.strilets@nuwm.edu.ua.

**Strilets Oleh Romanovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Docent, National University of Water and Environmental Engineering, Associate Professor at the Department of Analytical Dynamics, Engineering Graphics and Mechanical Engineering, Rivne; tel.: (097) 645-44-13; e-mail: o.r.strilets@nuwm.edu.ua.

**Стрілець Володимир Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет водного господарства та природокористування, професор кафедри теоретичної механіки, інженерної графіки та машинознавства, м. Рівне; тел.: (0362) 62-25-35; e-mail: v.m.strilets@nuwm.edu.ua.

**Стрилец Владимир Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет водного хозяйства та природопользования, профессор кафедры теоретической механики, инженерной графики и машиноведения, г. Ровно; тел.: (0362) 62-25-35; e-mail: v.m.strilets@nuwm.edu.ua.

**Strilets Volodymyr Mykolaiovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Docent, National University of Water and Environmental Engineering, Professor at the Department of Analytical Dynamics, Engineering Graphics and Mechanical Engineering, Rivne; tel.: (0362) 62-25-35; e-mail: v.m.strilets@nuwm.edu.ua.

УДК 621.833.6

**В. А. МАТУСЕВИЧ, Ю. В. ШАРАБАН, А. В. ШЕХОВ, В. Т. АБРАМОВ**

### ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТИПА 3К

Розглянута методика проектування планетарних механізмів типу 3К оптимальних за значенням якісних характеристик його зацеплень. Як критерій оптимізації прийняті обмеження, що накладаються на коефіцієнти торцевого перекриття, питомого тиску і ковзання, значення яких є функціями коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс. При цьому вибрані значення коефіцієнтів зміщення зубчастих коліс забезпечують їх міцність і витривалість. Наведений приклад оптимального проектування конструкції планетарного механізму типу 3К.

**Ключові слова:** планетарний механізм типу 3К, коефіцієнт зміщення, коефіцієнт торцевого перекриття, коефіцієнт питомого тиску, коефіцієнт питомого ковзання, умова співвісності.

Рассмотрена методика проектирования планетарных механизмов типа 3К оптимальных по значению качественных характеристик его зацеплений. В качестве критерия оптимизации приняты ограничения, накладываемые на коэффициенты торцевого перекрытия, удельного давления и скольжения, значения которых являются функциями коэффициентов смещения зубчатых колес. При этом выбранные значения коэффициентов смещения зубчатых колес обеспечивают их прочность и выносливость. Приведен пример оптимального проектирования конструкции планетарного механизма типа 3К.

**Ключевые слова:** планетарный механизм типа 3К, коэффициент смещения, коэффициент торцевого перекрытия, коэффициент удельного давления, коэффициент удельного скольжения, условие соосности.

The design technique of planetary mechanisms of type 3K of optimal by value quality descriptions of his gears is considered. As a criterion of optimization, the limitations laid on the coefficients of profile contact ratio are accepted, specific pressure and profile sliding factor, values of that are the functions of coefficients of addendum of gears. Thus, the chosen values of coefficients of addendum of gears provide their durability and endurance. Coefficients of addendum of gears subdivide into varied and calculated. The values of the varied coefficients of addendum of gears set. The values of the calculated coefficients of addendum of gears are determined from three equalizations. Equalizations are get from the terms of coaxial of the gears of mechanism. An example of the optimal design of construction of planetary mechanism of type 3K is made.

**Keywords:** planetary mechanism of type 3K, addendum modification coefficient, profile contact ratio, coefficient of specific pressure, profile sliding factor, condition of coaxial gears.

**Введение.** Особенностью планетарных механизмов типа 3К является то, что одно и то же значение его передаточного отношения может быть реализовано при различных значениях чисел зубьев его зубчатых колес [1]. В таких случаях выбор чисел зубьев осуществляется с учетом требований, предъявляемых к их

прочности и выносливости. Но не всегда этих требований достаточно для правильного выбора чисел зубьев. Иногда приходится учитывать ограничения на значения качественных характеристик зацеплений проектируемого планетарного механизма типа 3К. Проектирование таких механизмов является сложной и трудоем-