

О. Р. Стрілець*, В. О. Малащенко, В. Р. Пасіка, В. М. Стрілець*

*Національний університет водного господарства та природокористування,
кафедра теоретичної механіки, інженерної графіки та машинознавства,
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технічної механіки та динаміки машин

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ПРИВОДУ ІЗ ЗУБЧАСТОЮ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЧЕРЕЗ ЕПІЦИКЛ

© Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Пасіка В. Р., Стрілець В. М., 2019

Розглянуто динамічні процеси у пристрої для керування змінами швидкості із зубчастою диференціальною передачею і замкнутою гідросистемою через епіцикл, коли урухомчою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а урухомною – водило або навпаки. Наведено рівняння динаміки таких пристроїв залежно від умов їх роботи, які є підґрунтям для подальшого комп'ютерного моделювання та проведення кількісного аналізу з метою вибору необхідної гідросистеми керування швидкістю.

Ключові слова: динамічний процес, пристрій для керування змінами швидкості, зубчаста диференціальна передача, замкнута гідросистема, епіцикл, сонячне зубчасте колесо, водило, сателіт.

O. Strilets, V. Malaschenko, V. Pasika, V. Strilets

DYNAMIC MODEL OF SPEED CONTROL OF THE DRIVE WITH GEAR DIFFERENTIAL TRANSMISSION THROUGH THE EPICICLE

Dynamic processes in the device for speed changes control with differential gear and closed circuit hydrosystem through the ring gear, when the driving link is the sun gear, and the driven – the carrier or vice versa are considered. The equation of the dynamics of such devices is given, depending on the conditions of their work, which are the basis for further computer simulation and conducting of quantitative analysis with the purpose of choosing the necessary speed control hydrosystem.

Key words: dynamic process, device for speed changes control, differential gear, closed circuit hydrosystem, ring gear, sun gear, carrier, planet.

Вступ. Під час виконання технологічних операцій машинами у різних галузях промисловості необхідна зміна швидкості за величиною і напрямком. Для керування цими параметрами у сучасній техніці запропоновано нові пристрої у вигляді зубчастих диференціальних передач із замкнутими гідросистемами [1–4]. Для згаданих пристроїв керування змінами швидкості здійснено широкі кінематичні [5–14] та енергетичні [15–20] дослідження. Для проведення силових досліджень, проектування та експлуатації таких пристроїв необхідні знання про динамічні процеси, які виникають у них. Дослідження динамічних процесів у пристроях зміни швидкості із зубчастими диференціалами, у яких керування швидкістю здійснюється за допомогою замкнутої гідросистеми

через епіцикл, є актуальним завданням. Для розв'язання цієї задачі необхідно знати математичну модель динамічних процесів приводів із зубчастими диференціальними передачами з метою вибору необхідної замкнутої гідросистеми. Це основне завдання цієї роботи.

Аналіз стану проблеми та формулювання завдання. Нові пристрої керування змінами швидкості із зубчастими диференціальними передачами за допомогою замкнутої гідросистеми через ланки керування (епіцикли, або сонячні зубчасті колеса, або водила) розглянуто у роботах [1–20] та інших публікаціях.

На основі аналізу періодичних наукових джерел можна зробити висновок, що на динамічні процеси у таких передачах звернено недостатньо уваги. Питання динаміки таких пристроїв для керування змінами швидкості очікують вирішення. З кінця 50-х років двадцятого століття почалось систематичне вивчення динаміки механізмів і машин та розроблення методів зменшення впливу динамічних навантажень таких пристроїв.

Мета роботи. Розробити математичну модель динамічних процесів у пристроях зміни швидкості за допомогою зубчастих диференціальних передач з метою вибору необхідної замкнутої гідросистеми у випадку, коли ланкою керування є епіцикл. Для досягнення цієї мети поставлено завдання розробити динамічну модель зубчастих диференціальних передач: один вал урухомлюється електричним двигуном, а другий (гідродвигун) – використовується для дотримання необхідного закону руху на урухомній ланці.

Основна частина. На рис. 1 показано гідравлічну схему замкнутої гідросистеми, яка містить гідронасос 1, трубопроводи 2, регулювальний кран 3, зворотний клапан 4 і ємкості з рідиною 5. Замкнута гідросистема працює так. Під час обертання гідронасос перекачує рідину в замкнутій гідросистемі, складеній з трубопроводів, зворотного клапана, ємкості для рідини і регулювального крана, коли регулювальний кран відкритий. Якщо регулювальний кран закритий, тоді замкнута гідросистема закрита, тобто гідронасос зупинений і ланка, на якій він встановлений, буде зупинена. Цей принцип роботи замкнутої гідросистеми використано для керування кутовою швидкістю урухомної ланки зубчастого диференціала через зміну швидкості однієї з ланок керування за рахунок пропускної здатності рідини, яка рухається в замкнутій гідросистемі, через регулювальний кран. Тобто кутова швидкість ланки керування ω_k змінюється від 0 до ω_{kmax} . Дозаповнення гідросистеми рідиною здійснюється із ємкості 5 через зворотний клапан 4.

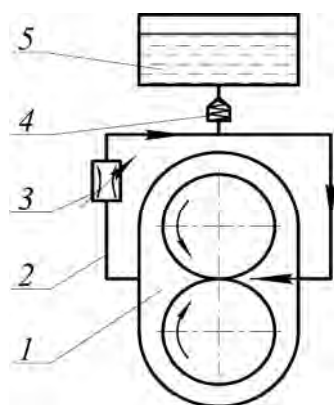


Рис. 1. Замкнута гідравлічна система

На рис. 2 показано зубчастий диференціал з приводом епіциклу 3 від сонячного колеса 1 і замкнутої гідросистеми 5 через пару зубчастих коліс 3'-4. Оскільки зубчастий диференціал має два ступені свободи, то можуть бути дві урухомчі ланки й одна урухомна, або навпаки – одна урухомча і дві урухомні. У нашому випадку маємо перший варіант.

Розглянемо випадок, коли урухомчою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а урухомною – водило. Керування зміною швидкості урухомної ланки – водила здійснюється через епіцикл. Якщо прийняти кутову швидкість сонячного колеса за $\omega_1 = const$, тоді за рахунок зміни швидкості епіциклу від 0 до ω_{3max} можна плавно змінювати швидкість водила (ω_H). Зміну швидкості епіциклу 3 забезпечує гідросистема 5. Аналогічно виконуватиметься зміна швидкості у зворотному напрямку, коли урухомчою ланкою буде водило, а урухомною – сонячне зубчасте колесо.

На рис. 3 наведено блок-схему передачі обертального моменту від сонячного зубчастого колеса до водила.

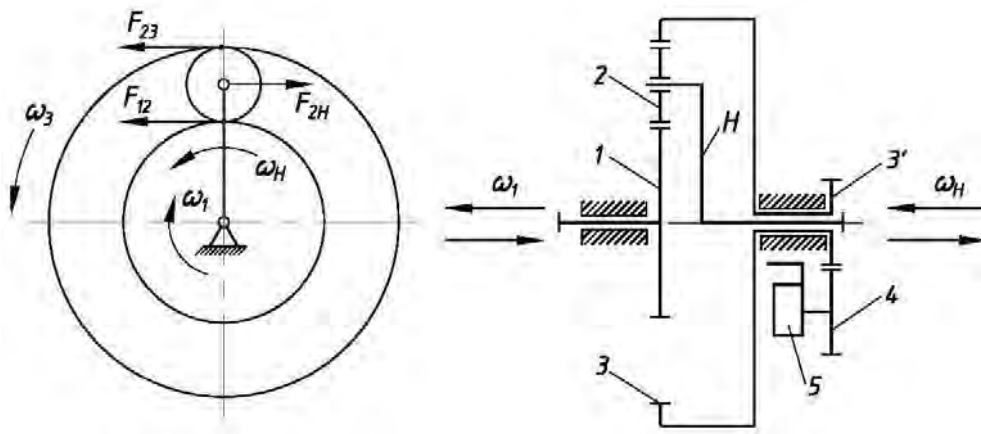


Рис. 2. Схема зубчастого диференціала з керуванням через епіцикл

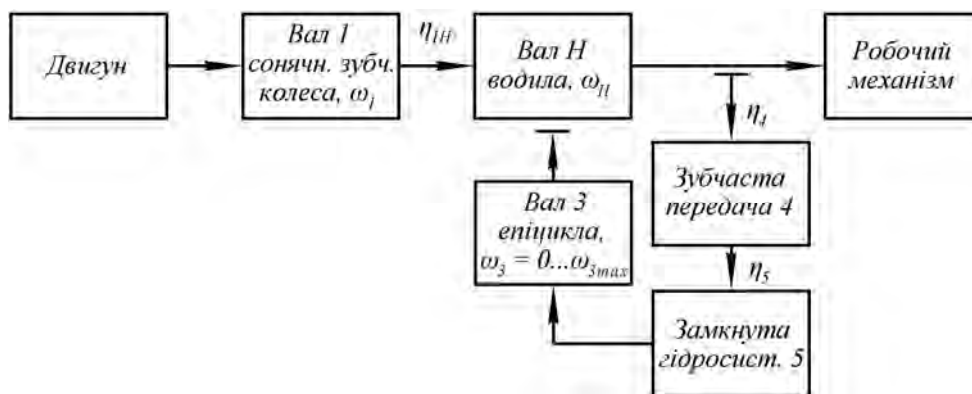


Рис. 3. Блок-схема передачі обертального моменту від сонячного зубчастого колеса до водила

Змодельємо рух механічної системи (диференціал плюс урухомник епіцикла) у формалізованому вигляді, застосувавши рівняння Лагранжа II роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\omega}} \right) = \Sigma M_i \cdot \quad (1)$$

Для цього необхідно записати вирази для кінетичної енергії системи.

У вираз для кінетичної енергії системи входять кінетичні енергії таких ланок:

T_1 – сонячного колеса з валом; T_2 – блока сателітів; T_3 – епіцикла (зубчасте колесо 3 і спарене 3'); T_H – водила; T_4 – зубчастого колеса 4 з валом. Тобто

$$T = \frac{1}{2} (I_1 \omega_1^2 + k I_2 \omega_2^2 + k m_2 v_{C_2}^2 + I_3 \omega_3^2 + I_H \omega_H^2 + I_4 \omega_4^2), \quad (2)$$

де ω_i і m_2 – відповідно кутові швидкості, моменти інерції ланок відносно центрів мас і маса блока сателітів; k – кількість сателітів; $v_{C_2} = \omega_H r_H$ – колова швидкість осі обертання сателіта; r_H – радіус обертання водила. Цей радіус дорівнює сумі початкових радіусів сонячного і планетарного коліс $r_H = 0,5(d_{w_1} + d_{w_2})$.

Кутові швидкості сателітів і епіцикла виразимо через кутові швидкості урухомчих ланок [21]:

$$\omega_2 = \omega_1 i_{21}^{(H)} + \omega_H i_{2H}^{(1)}, \quad \omega_3 = \omega_1 i_{31}^{(H)} + \omega_H i_{3H}^{(1)}.$$

Підставляємо отримані вирази у вираз (1) і після алгебраїчних перетворень отримуємо залежність кінетичної енергії системи від кутових швидкостей урухомчих ланок та інерційних характеристик

$$T=0,5\left(I_{\omega}\omega_1^2+2I_{H\omega}\omega_H\omega_1+I_H\omega_H^2\right), \quad (3)$$

де $I_{\omega}=I_1+kI_2\left[i_{21}^{(H)}\right]^2+I_3\left[i_{31}^{(H)}\right]^2+I_4i_{43}^2\left[i_{31}^{(H)}\right]^2$,

$$I_{H\omega}=2\left[kI_2i_{21}^{(H)}i_{2H}^{(1)}+I_3i_{31}^{(H)}i_{3H}^{(1)}+I_4i_{34}^2i_{31}^{(H)}i_{3H}^{(1)}\right],$$

$$I_H=kI_2\left[i_{2H}^{(1)}\right]^2+km_2r_H^2+I_3\left[i_{3H}^{(1)}\right]^2+I_H+I_4i_{43}^2\left[i_{3H}^{(1)}\right]^2.$$

Підставляючи вираз для кінетичної енергії у рівняння Лагранжа II роду і беручи часткові похідні за кутовими швидкостями ω_1 і ω_H , отримаємо систему двох диференціальних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} I_{\omega}\ddot{\omega}_1+I_{H\omega}\ddot{\omega}_H &=M_{зв_1}, \\ I_{H\omega}\ddot{\omega}_1+I_H\ddot{\omega}_H &=M_{зв_H} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де $M_{зв_1}=M_1+M_4i_{41}^{(H)}$, $M_{зв_H}=-M_H+M_Hi_{4H}^{(1)}$. (4)

Зведений момент $M_{зв_1}$ визначаємо з рівності потужностей моментів сил, водило нерухоме, а момент $M_{зв_H}$ – якщо нерухоме сонячне колесо.

Оскільки момент $M_1=M_1(\omega_1)$ є функцією від кутової швидкості сонячного колеса, момент зміни навантаження на валу водила $M_H=M_H(t)$ залежить від часу, а $M_4=M_4(V_{рід})$ залежить від витрат рідини гідросистеми, то у загальному випадку отримана система (3) нелінійна.

Передатні відношення, які входять в отримані вирази, виражаємо так:

$$\begin{aligned} i_{31}^{(H)} &= -\frac{z_1}{z_3}; & i_{21}^{(H)} &= -\frac{z_1}{z_2}; & i_{3H}^{(1)} &= 1-i_{31}^{(H)}=1+\frac{z_1}{z_3}; \\ i_{4H}^{(1)} &= 1-i_{41}^{(H)}=1+\frac{z_3'z_1}{z_4z_3}; & i_{2H}^{(1)} &= 1-i_{21}^{(H)}=1+\frac{z_1}{z_2}; & i_{41}^{(H)} &= \frac{z_3'z_1}{z_4z_3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отже, в роботі розроблено математичну модель руху диференціальної передачі з можливістю керування рухом епіциклу замкнутою гідросистемою з метою забезпечення необхідного закону зміни навантаження на урухомній ланці – водилі.

Висновок. Розроблено математичну модель динамічних процесів у пристроях зміни швидкості за допомогою зубчастих диференціальних передач у випадку, коли ланкою керування є епіцикл. Наведені рівняння динаміки таких пристроїв є підґрунтям для подальшого комп'ютерного моделювання та здійснення кількісного аналізу з метою вибору необхідної гідросистеми керування швидкістю.

1. Малащенко В. О. Класифікація способів і пристроїв керування процесом зміни швидкості у техніці / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // Підйомно-транспортна техніка. – Одеса, 2015. – № 1. – С. 70–78. 2. Стрілець О. Р. Способи керування змінами швидкості у техніці / О. Р. Стрілець // Збірник тез. VIII Міжнародної конференції “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси ПРТК-2015. – Київ: 18–19 травня, 2015. – С. 220–221. 3. Стрілець О. Р. Огляд і аналіз способів керування змінами швидкості в техніці: 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові / О. Р. Стрілець //: тези.– Львів: КІНПАТPI ЛТД, 2015. 28–29 травня 2015 року. – С. 196–197. 4. Malashchenko, V. Fundamentals of Creation of New Devices for Speed Change Management [Text] / V. Malashchenko, O. Strilets, V. Strilets // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – Lviv, 2015. – V 1. – № 2. – P. 11–20. 5. Стрілець О. Р.

Кінематичні можливості зубчастих диференціальних передач з замкнутою гідросистемою / О. Р. 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. 6. Стрілець, О. Р. Керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі через епіцикл [Текст] / О. Р. Стрілець // *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. – № 4(80). – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – С. 129–135. 7. Стрілець О. Р. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через сонячне зубчасте колесо [Текст] / О. Р. Стрілець // *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – № 5(229). – С. 68–72. 8. Стрілець О. Р. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через водило [Текст] / О. Р. Стрілець // *Вісник Кременчуцького національного університету*. Кременчук: Кр.НУ, 2015. – Вип. 6(95). – С. 72–77. 9. Малащенко В. А. Новый способ бесступенчатого изменения скорости при помощи зубчатых дифференциальных передач с замкнутой гидросистемой / В. А. Малащенко, О. Р. Стрелец, В. Н. Стрелец. – М.: Международный инженерный журнал “Приводы и компоненты машин”, № 2, 2016. – С. 3–6. 10. Malashenko, 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 AFTT*. – Warshava, 2016. – Iss. № 38. – pp. 13–19. 11. Вавилов А. В. Совершенствование трансмиссий дорожных машин для повышения их конкурентоспособности и обеспечения импортозамещения / А. В. Вавилов, В. А. Малащенко, О. Р. Стрелец, В. М. Стрелец // *Научно-технический журнал “Автомобильные дороги и мосты”*. – Минск: 2016. – № 2 (18). – С. 102–108. 12. Малащенко В. О. Керування змінами швидкості за допомогою багатосходинкової зубчастої диференціальної передачі через сонячне зубчасте колесо [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. 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. 13. Малащенко В. О. Керування швидкістю руху машин багатоступеневою зубчастою передачею через епіцикл [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів: НУ “ЛП”, 2016. – № 838. – С. 57–63. 14. Малащенко В. О. Новий привод з диференціалом і замкнутою гідросистемою для керування швидкістю машини [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // *Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях”*. – № 3(83). – Вінниця: 2016. – С. 109–116. 15. Малащенко В. О. Залежність коефіцієнта корисної дії зубчастої диференціальної передачі від передаточного числа і швидкості керування [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець. / *Матеріали конференції, присвяченої 110-річчю С. М. Кожевнікову, НМАУ*. – Дніпро: 11–13 квітня 2017. – С. 145–148. 16. Малащенко В. О. ККД зубчастої диференціальної передачі у пристрої для керування змінами швидкості через водило [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. Серія: Проблеми механічного приводу”. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2017, № 25(1247). – С. 97–102. 17. Малащенко В. О. ККД зубчастої диференціальної передачі з внутрішнім і зовнішнім зачепленнями коліс у пристрої для керування змінами швидкості через епіцикл [Текст] / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – Львів: НУ “ЛП”. – 2017, № 866. – С. 62–69. 18. Malashchenko V. Justification of efficiency of epicyclic gear train in device for speed changes management / V. Malashchenko, O. Strilets, V. Strilets // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science (Український журнал із машинобудування і матеріалознавства)*. – Lviv: 2017. – Vol. 3. – No. 1. – P. 89–95. 19. Strilets O.R. The efficiency of the differential gear to devices for cont-rolling the speed change through a sun gear / O. R. Strilets // *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi, Issue 2(52)*, 2017. – P. 29–38. 20. Malashchenko V. O. Determining performance efficiency of the differential in a device for speed change through epicycle / V. O. Malashchenko, O. R. Strilets, V. M. Strilets // *Eastern-European Journal of enterprise technologies*. – Kharkiv: PC “Technology Center”, 2017. – No. 6/7(90). – pp. 51–57. 21. Барсов Г. А. Теория плоских механизмов и динамика машин / Г. А. Барсов, Л. В. Безменова, Л. С. Гродзенская и др. / под ред. А. В. Желиговского. – М.: Высшая школа, 1961. – 336 с.