

10. Roslivker E. G. Prochnost i zhestkost zubev peredach s zatsepleniem M.L. Novikova / Roslivker E. G. // Prochnost korpusov sudov i nadezhnost detaley mashin. Trudyi GIIVTa. Вып. 138. Gorkiy: 1975. P. 50–96.
11. Yakovlev A. S. Eschoy raz k voprosu effektivnosti primeneniya zubchatykh peredach s zatsepleniem Novikova / Yakovlev A.S. // Reduktoryi i privodyi. 2007. No 1, 2 (08). P. 48–54.

Поступила (received) 06.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Щодо бажаних сфер застосування зубчастих передач Новікова та евольвентних / В. І. Короткін // Вісник НТУ "ХПІ". Серія Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 82–87. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0791.

О предпочтительных сферах применения зубчатых передач Новикова и эвольвентных / В. И. Короткин // Вісник НТУ "ХПІ". Серія Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 82–87. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0791.

About preferred areas of Novikov gearing and involute gearing / V. I. Korotkin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: problems of the mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 23 (1195). – P. 82–87. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0791.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Короткін Віктор Ілліч – кандидат технічних наук, доцент, Південний федеральний університет, провідний науковий співробітник інституту математики, механіки і комп'ютерних наук ім. І. І. Воровича, м Ростов-на-Дону; тел.: (863) 297-52-23; e-mail: korotkin@math.rsu.ru.

Короткин Виктор Ильич – кандидат технических наук, доцент, Южный федеральный университет, ведущий научный сотрудник института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, г. Ростов-на-Дону; тел.: (863) 297-52-23; e-mail: korotkin@math.rsu.ru.

Korotkin Viktor Il'ich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, the Southern Federal University, Leading Researcher of the Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Rostov-on-Don; tel.: (863) 297-52-23; e-mail: korotkin@math.rsu.ru.

УДК 621.833.65

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

КЕРУВАННЯ ЗМІНАМИ ШВИДКОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОСХОДИНКОВОЇ ЗУБЧАСТОЇ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ СОНЯЧНЕ ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО

Розглянуто процес керування змінами швидкості за допомогою багатосходинкових зубчастих диференціальних передач з замкнутою гідросистемою, коли ведучою ланкою є епіцикл, а веденою водило, або навпаки. Керуючою ланкою є сонячне зубчасте колесо зв'язане з замкнутою гідросистемою, яка складається з гідронасоса, коротких трубопроводів, регульовального дроселя, зворотного клапана та ємності для рідини. Коли регульовальний дросель відкритий, маємо те, що сонячне зубчасте колесо через зубчасту передачу приводить у рух гідронасос, який перекачує рідину в замкнутій гідросистемі. Якщо регульовальний дросель закритий, тоді замкнута гідросистема закрита, тобто гідронасос зупинений і, при цьому, сонячне зубчасте колесо зупинене. Таким чином, в залежності від пропускної здатності регульовального дроселя, швидкість сонячного зубчастого колеса змінюється і, при цьому, змінюється швидкість веденої ланки. За допомогою комп'ютерного моделювання отримані графічні залежності між швидкостями ведучої, керуючої та веденої ланок.

Ключові слова: зміна швидкості, диференціальна передача, гідросистема, сонячне зубчасте колесо, водило, епіцикл, сателіт.

Рассмотрен процесс управления изменениями скорости при помощи многоступенчатых зубчатых дифференциальных передач с замкнутой гидросистемой, когда ведущим звеном есть эпицикл, а ведомым водило, или наоборот. Звеном управления есть солнечное зубчатое колесо, связанное с замкнутой гидросистемой, которая состоит с гидронасоса, коротких трубопроводов, регулирующего дросселя, обратного клапана и емкости для жидкости. Когда регулирующий дроссель открытый, имеем то, что солнечное зубчатое колесо через зубчатую передачу приводит в движение гидронасос, который перекачивает жидкость в замкнутой гидросистеме. Если регулирующий дроссель закрытый, тогда замкнутая гидросистема закрыта. Таким образом, в зависимости от пропускной способности регулирующего дросселя, скорость солнечного зубчатого колеса изменяется и, при этом, изменяется скорость ведомого звена. При помощи компьютерного моделирования получены графические зависимости между скоростями ведущего, управляющих и ведомого звеньями.

Ключевые слова: изменение скорости, дифференциальная передача, гидросистема, солнечное зубчатое колесо, водило, эпицикл, сателлит.

The article considers processes of speed change management via differential transmission with a closed hydrosystem when the driving element is a epicycle and the driven – is carrier or vice versa. The aim of the research is to describe the structure and principle of speed change by differential transmission with a closed hydrosystem, to investigate the kinematics of the process. The control element here is solar gear connected to closed hydrosystem. When the driving element is the epicycle, driven – is carrier and the management of carrier's speed is performed by changing the speed of solar gear, we have that solar gear drives the hydraulic pump that pumps fluid in a closed hydrosystem consisting of pipes and regulating throttle – when regulating throttle is opened. When regulating throttle is closed, then hydrosystem is immovable, hydraulic pump is stopped and so is solar gear. Thus, depending on the bandwidth of regulating throttle, speed of solar gear changes, while changing the speed of the carrier. We received graphic dependences between velocities between driving and driven elements by means of computer programing.

Keywords: speed change, epicyclic gear train, hydrosystem, sun gear, carrier, ring gear, planet.

© В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець, 2016

Вступ. Постановка проблеми. При виконанні робіт в різних галузях промисловості та забезпечення різних технологічних процесів виникає необхідність керування процесами зміни швидкості у техніці за величиною та напрямком її виконавчих механізмів. У вітчизняній [1–8] і зарубіжній [9] періодичній технічній літературі запропонований новий безсходінковий спосіб керування змінами швидкості за допомогою односходінкових однорядних і двохрядних зубчастих диференціальних передач з замкнутою гідросистемою.

Для розширення діапазону регулювання зміни швидкості у приводах за рахунок зубчастої диференціальної передачі з пристроєм для керування змінами швидкості у вигляді замкнутої гідросистеми зубчаста диференціальна передача пропонується багатосходінковою – з двох або більше сходінок, з'єднаних між собою. Такі передачі розроблені на рівні патентів України [10–12] і потребують подальшого теоретичного кінематичного та динамічного дослідження.

Мета роботи. Виконати теоретично-комп'ютерне дослідження процесу залежності зміни швидкості за допомогою багатосходінкової диференціальної передачі з замкнутими гідросистемами між ведучою ланкою (водилом першої сходінки) і веденою (епіциклом n -ї сходінки), або навпаки, коли керування виконується через сонячне зубчасте колесо.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 показана багатосходінкова (n -сходінкова, а $i = 1, 2, \dots, n$) зубчаста диференціальна передача, в якій зубчасте колесо – епіцикл $3_{(1)}$ першої сходінки з'єднано з водилом $4_{(2)}$ другої сходінки, зубчасте колесо – епіцикл $3_{(2)}$ другої сходінки з'єднано з водилом $4_{(3)}$ третьої сходінки, ..., зубчасте колесо – епіцикл $3_{(n-1)}$ ($n-1$ -ї сходінки з'єднано з водилом $4_{(n)}$ n -ї сходінки, а керування швидкістю здійснюється за рахунок сонячних зубчастих коліс першої $1_{(1)}$, другої $1_{(2)}$, ..., n -ї $1_{(n)}$ сходінок за допомогою встановлених на них замкнутих гідросистем $6_{(1)}, 6_{(2)}, \dots, 6_{(n)}$. Ведучою ланкою такої n -сходінкової зубчастої диференціальної передачі є водило $4_{(1)}$ першої сходінки, а веденою ланкою – зубчасте колесо – епіцикл $3_{(n)}$ n -ї сходінки. Замкнуті гідросистеми $6_{(1)}, 6_{(2)}, \dots, 6_{(n)}$ однакові за будовою, розміщені на корпусі 5 і з'єднані з сонячним зубчастим колесом. Будова та робота замкнутої гідросистеми більш детально описана, наприклад, в [1]. У її склад входять шестеренчастий гідронасос, короткі трубопроводи, регулювальний дросель, зворотний клапан і ємність для рідини. Керування зміною швидкості здійснюється за рахунок дроселювання рідини, яка рухається в замкнутих гідросистемах.

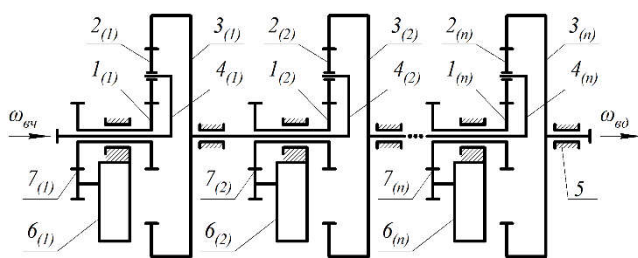


Рис. 1 – Схема багатосходінкової зубчастої диференціальної передачі з замкнутими гідросистемами з керування через сонячні зубчасті колеса

Зв'язок між швидкостями веденої ланки (зубчастого колеса – епіцикла $3_{(n)}$) $\omega_{вд}$ і ведучої ланки (води́ла

$4_{(1)}$) $\omega_{вч}$ можна отримати на основі умов, коли для окремих сходінок зв'язок між швидкостями має вид:

$$\omega_{3(1)} = \frac{\omega_{4(1)}(1+u_{13(1)}^{(4)})-\omega_{1(1)}}{u_{13(1)}^{(4)}}; \quad \omega_{3(2)} = \frac{\omega_{4(2)}(1+u_{13(2)}^{(4)})-\omega_{1(2)}}{u_{13(2)}^{(4)}};$$

$$\omega_{3(n)} = \frac{\omega_{4(n)}(1+u_{13(n)}^{(4)})-\omega_{1(n)}}{u_{13(n)}^{(4)}}; \quad \omega_{4(2)}=\omega_{3(1)}; \dots; \omega_{4(n)}=\omega_{3(n-1)}. \quad (1)$$

В залежностях (1) вже враховано те, що значення передаточного числа між першою і третьою ланкою, при зупиненому водилі, для зубчастої диференціальної передачі (рис. 1) від'ємне тому, що в окремих сходінках маємо по одному зовнішньому та одному внутрішньому зубчастому зачепленні: $u_{13(1)}^{(4)} = -\frac{z_{3(1)}}{z_{1(1)}}$;

$$u_{13(2)}^{(4)} = -\frac{z_{3(2)}}{z_{1(2)}}, \dots, u_{13(n)}^{(4)} = -\frac{z_{3(n)}}{z_{1(n)}}, \text{ де } z_{1(1)}, z_{1(2)}, \dots, z_{1(n)}$$

– число зубів сонячного зубчастого колеса, відповідно першої, другої, ..., n -ї сходінки; $z_{3(1)}, z_{3(2)}, z_{3(3)}, \dots, z_{3(n)}$ – число зубів епіцикла, відповідно першої, другої, ..., n -ї сходінки. Тому тут і далі у залежності між швидкостями ведучих і ведених ланок значення передаточного числа слід підставляти завжди додатнім.

Розглянемо двохсходінкову зубчасту диференціальну передачу, показану на рис. 2, в якій зубчасте колесо – епіцикл $3_{(1)}$ першої сходінки з'єднано з водилом $4_{(2)}$ другої сходінки, а керування швидкістю здійснюється за рахунок сонячних зубчастих коліс першої $1_{(1)}$ та другої $2_{(2)}$ сходінок за допомогою встановлених на них замкнутих гідросистем $6_{(1)}$ і $6_{(2)}$.

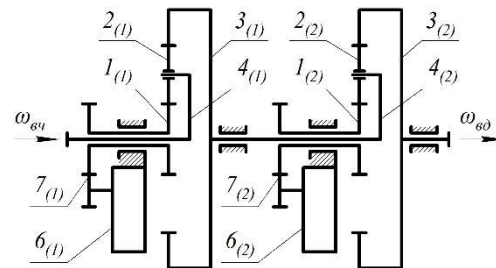


Рис. 2 – Схема двохсходінкової диференціальної передачі з замкнутими гідросистемами з керування через сонячні зубчасті колеса

Ведучою ланкою такої двохсходінкової диференціальної передачі є водило $4_{(1)}$ першої сходінки, а веденою ланкою – зубчасте колесо – епіцикл $3_{(2)}$ другої сходінки. Зв'язок між швидкостями веденої ланки (зубчастого колеса – епіцикла $3_{(2)}$) $\omega_{вд}$ і ведучої ланки (води́ла $4_{(1)}$) $\omega_{вч}$ отримаємо використавши умови (1)

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч}(1+u_{13(1)}^{(4)})(1+u_{13(2)}^{(4)})-\omega_{1(1)}(1+u_{13(2)}^{(4)})-\omega_{1(2)}u_{13(1)}^{(4)}}{u_{13(1)}^{(4)}u_{13(2)}^{(4)}}. \quad (2)$$

де $\omega_{1(1)}, \omega_{1(2)}$ – швидкості сонячних зубчастих коліс, відповідно першої $1_{(1)}$ і другої $1_{(2)}$ сходінок, які є змінними за рахунок замкнутих гідросистем $6_{(1)}$ і $6_{(2)}$: $\omega_{1(1)} = 0 \dots \omega_{1(1)\max}$ і $\omega_{1(2)} = 0 \dots \omega_{1(2)\max}$.

Для того щоб більш наочно показати характер зміни швидкості, розглянемо двохсходінкову зубчасту у якій передаточні числа $u_{13(i)}^{(4)}$ рівні для обох сходінок

$u_{13(i)}^{(4)} = u_{13}^{(4)}$, а кутова швидкість сонячного колеса другої сходинки $\omega_{1(2)} = 0$. Для такої передачі маємо:

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч} (1 + u_{13}^{(4)})^2 - \omega_{1(1)} (1 + u_{13}^{(4)})}{(u_{13}^{(4)})^2} \quad (3)$$

Формула (3) запрограмована та за допомогою комп'ютерного моделювання отримані графічні залежності $\omega_{вд} = f(\omega_{1(1)}, \omega_{1(2)}, \omega_{вч}, u_{13}^{(4)})$, при різних передаточних відношеннях $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13(3)}^{(4)} = 0,1 \dots 0,2$, та кутових швидкостях ведучої ланки $\omega_{вч} = 75 \dots 300$ рад/с. Графічні залежності, отримані для $\omega_{вч} = 100$ рад/с показані на рис. 3.

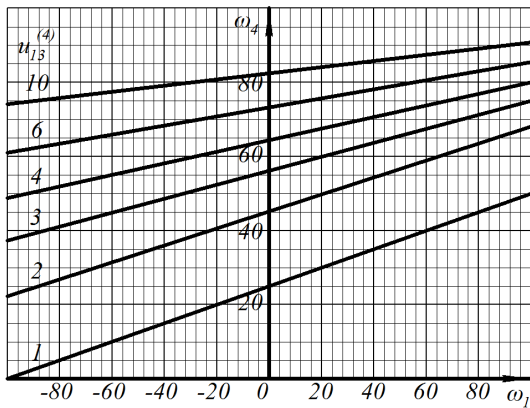


Рис. 3 – Залежності $\omega_{вд} = f(\omega_{1(1)}, \omega_{1(2)}, \omega_{вч}, u_{13}^{(4)})$ при $\omega_{вч} = 100$ рад/с, $\omega_{1(2)} = 0$ і $u_{31(1)}^{(4)} = u_{31(2)}^{(4)} = u_{31}^{(4)} = 0,1 \dots 0,2$

Якщо за ведучу ланку прийняти епіцикл, а веденою ланкою буде водило, тоді з умов (1) маємо

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч} u_{13(1)}^{(4)} u_{13(2)}^{(4)} + \omega_{1(1)} u_{13(2)}^{(4)} + \omega_{1(2)} (1 + u_{13(1)}^{(4)})}{(1 + u_{13(1)}^{(4)}) (1 + u_{13(2)}^{(4)})} \quad (4)$$

де $\omega_{вд}$ – швидкість водила,
 $\omega_{вч}$ – швидкість зубчастого колеса – епіцикла.

Задавшись аналогічними попередньому випадку даними отримаємо:

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч} (u_{13}^{(4)})^2 + \omega_{1(1)} (u_{13}^{(4)})}{(1 + u_{13}^{(4)})^2} \quad (5)$$

Запрограмувавши вираз (5) отримані графічні залежності, при аналогічних вихідних даних, між швидкостями $\omega_{вд}$ водила і $\omega_{вч}$ зубчастого колеса – епіцикла, показані на рис. 4.

Далі на рис. 5 показана трисходинкова зубчаста диференціальна передача, в якій епіцикл $3_{(1)}$ першої сходинки з'єднаний з водилом $4_{(2)}$ другої сходинки, епіцикл $3_{(2)}$ другої сходинки з'єднаний з водилом $4_{(3)}$ третьої сходинки, а керування швидкістю здійснюється за рахунок сонячних зубчастих коліс першої $1_{(1)}$, другої $1_{(2)}$ і третьої $1_{(3)}$ сходинки за допомогою встановлених на них замкнутих гідросистем $6_{(1)}$, $6_{(2)}$, і $6_{(3)}$. Ведучою ланкою такої трисходинкової зубчастої диференціальної передачі є водило $4_{(1)}$ першої сходинки, а веденою ланкою – епіцикл $3_{(3)}$ третьої сходинки.

Зв'язок між швидкостями веденої ланки (зубчастого колеса – епіцикла $3_{(3)}$) $\omega_{вд}$ і ведучої ланки (водила $4_{(1)}$) $\omega_{вч}$, виходячи з умов (1) має вигляд

$$\omega_{вд} = \frac{\left(\omega_{вч} \prod_{i=1}^3 (1 + u_{13(i)}^{(4)}) - \omega_{1(1)} \prod_{i=2}^3 (1 + u_{13(i)}^{(4)}) - \omega_{1(2)} u_{13(1)}^{(4)} (1 + u_{13(3)}^{(4)}) - \omega_{1(3)} u_{13(1)}^{(4)} u_{13(2)}^{(4)} \right)}{\prod_{i=1}^3 (u_{13(i)}^{(4)})} \quad (6)$$

де $\omega_{1(1)}$, $\omega_{1(2)}$, $\omega_{1(3)}$ – швидкості сонячних зубчастих коліс, відповідно першої, другої та третьої сходинки, величину яких можна змінювати за допомогою замкнутих гідросистем $6_{(1)}$, $6_{(2)}$, і $6_{(3)}$ у певному діапазоні: $\omega_{1(1)} = 0 \dots \omega_{1(1)max}$, $\omega_{1(2)} = 0 \dots \omega_{1(2)max}$, $\omega_{1(3)} = 0 \dots \omega_{1(3)max}$.

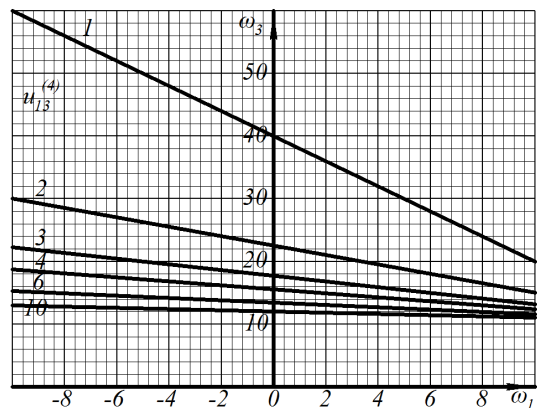


Рис. 4 – Залежності $\omega_{вд} = f(\omega_{1(1)}, \omega_{1(2)}, \omega_{вч}, u_{13}^{(4)})$ при $\omega_{вч} = 100$ рад/с, $\omega_{1(2)} = 0$ і $u_{31(1)}^{(4)} = u_{31(2)}^{(4)} = u_{31}^{(4)} = 0,1 \dots 0,2$

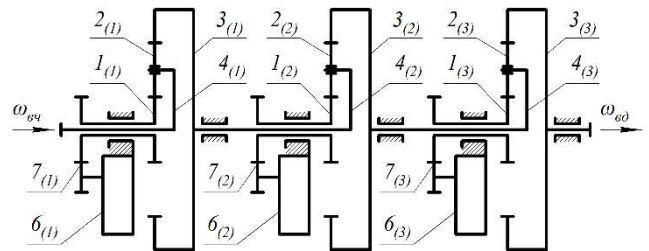


Рис. 5 – Схема трисходинкової диференціальної передачі з замкнутими гідросистемами з регулюванням через епіцикли

Для наочності характеру зміни швидкості через трисходинкову диференціальну передачу з пристроями у вигляді замкнутих гідросистем, задамося умовами: $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13(3)}^{(4)} = u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$, $\omega_{1(2)} = 0$, $\omega_{1(3)} = 0$. Для такого випадку вираз (6) отримає вигляд:

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч} (1 + u_{13}^{(4)})^3 - \omega_{1(1)} (1 + u_{13}^{(4)})^2}{(u_{13}^{(4)})^3} \quad (7)$$

Із запрограмованої формули (5) отримані графічні залежності $\omega_{вд} = f(\omega_{1(1)}, \omega_{1(2)}, \omega_{1(3)}, \omega_{вч}, u_{13}^{(4)})$, при різних кутових швидкостях ведучої ланки $\omega_{вч} = 75 \dots 300$ рад/с. Отримані графічні залежності при $\omega_{вч} = 100$ рад/с показані на рис. 6.

Якщо за ведучу ланку прийняти зубчасте колесо – епіцикл, а веденою ланкою буде водило, тоді з умов (1) будемо мати

$$\omega_{вд} = \frac{\left(\omega_{вч} \prod_{i=1}^3 (u_{13(i)}^{(4)}) + \omega_{1(1)} \prod_{i=2}^3 (u_{13(i)}^{(4)}) + \omega_{1(2)} u_{13(3)}^{(4)} (1 + u_{13(1)}^{(4)}) + \omega_{1(3)} \prod_{i=1}^2 (1 + u_{13(i)}^{(4)}) \right)}{\prod_{i=1}^3 (1 + u_{13(i)}^{(4)})}, \quad (8)$$

де $\omega_{вд}$ – швидкість водила;
 $\omega_{вч}$ – швидкість зубчастого колеса – епіцикла.

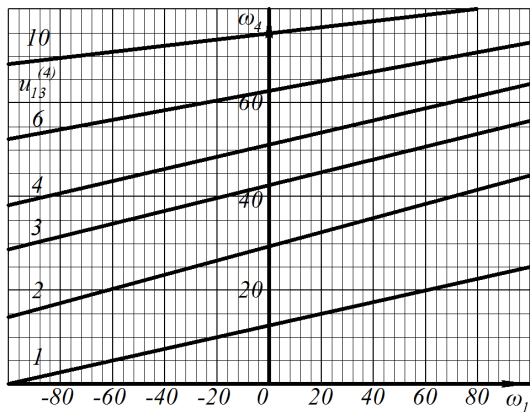


Рис. 6 – Залежності $\omega_{вд} = f(\omega_{1(1)}, \omega_{1(2)}, \omega_{вч}, u_{13}^{(4)})$ при $\omega_{вч} = 100$ рад/с, $\omega_{1(2)} = \omega_{1(3)} = 0$ і $u_{31(1)}^{(4)} = u_{31(2)}^{(4)} = u_{31(3)}^{(4)} = 1 \dots 10$

Прийнявши $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13(3)}^{(4)} = u_{13}^{(4)} = 1.10$, $\omega_{1(2)} = 0$, $\omega_{1(3)} = 0$, отримаємо

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч} (u_{13}^{(4)})^3 + \omega_{1(1)} (u_{13}^{(4)})^2}{(1 + u_{13}^{(4)})^3}. \quad (9)$$

На основі запрограмованого виразу (9) отримані графічні залежності між швидкостями $\omega_{вд}$ епіцикла і $\omega_{вч}$ водила, показані на рис. 7.

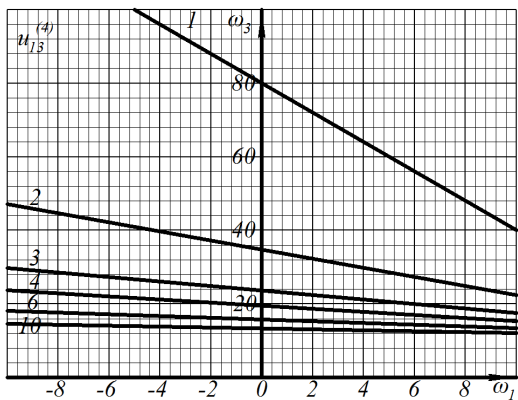


Рис. 7 – Залежності $\omega_{вд} = f(\omega_{1(1)}, \omega_{1(2)}, \omega_{вч}, u_{13}^{(4)})$ при $\omega_{вч} = 100$ рад/с, $\omega_{1(2)} = \omega_{1(3)} = 0$ і $u_{31(1)}^{(4)} = u_{31(2)}^{(4)} = u_{31(3)}^{(4)} = 1 \dots 10$

Проаналізувавши отримані залежності (2), (4), (6) і (8) запишемо узагальнені формули для залежностей між

кутовими швидкостями у диференціальних передачах з трьома і більше (n) сходами та ведучою ланкою:

- водилом:

$$\omega_{вд} = \frac{\left(\omega_{вч} \prod_{i=1}^n (1 + u_{13(i)}^{(4)}) - \omega_{1(1)} \prod_{i=2}^n (1 + u_{13(i)}^{(4)}) - \sum_{i=2}^{n-1} \left(\omega_{1(i)} \prod_{k=1}^{i-1} u_{13(k)}^{(4)} \prod_{k=i+1}^n (1 + u_{13(k)}^{(4)}) \right) - \omega_{1(n)} \prod_{i=1}^{n-1} (u_{13(i)}^{(4)}) \right)}{\prod_{i=1}^n (u_{13(i)}^{(4)})}; \quad (10)$$

- епіциклом:

$$\omega_{вд} = \frac{\left(\omega_{вч} \prod_{i=1}^n (u_{13(i)}^{(4)}) + \omega_{1(1)} \prod_{i=2}^n (u_{13(i)}^{(4)}) + \omega_{1(n)} \prod_{i=1}^{n-1} (1 + u_{13(i)}^{(4)}) + \sum_{i=2}^{n-1} \left(\omega_{1(i)} \prod_{k=i+1}^n u_{13(k)}^{(4)} \prod_{k=1}^{i-1} (1 + u_{13(k)}^{(4)}) \right) \right)}{\prod_{i=1}^n (1 + u_{13(i)}^{(4)})}. \quad (11)$$

Якщо передаточні числа усіх сходок прийняти однаковими, тобто $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = \dots = u_{13(n)}^{(4)} = u_{13}^{(4)}$, то залежності (10) та (11) можна спростити до вигляду:

- для зубчастої диференціальної передачі з ведучою ланкою – водилом:

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч} (1 + u_{13}^{(4)})^n - \sum_{i=1}^n \left(\omega_{1(i)} (u_{13}^{(4)})^{i-1} (1 + u_{13}^{(4)})^{n-i} \right)}{(u_{13}^{(4)})^n}; \quad (12)$$

- для зубчастої диференціальної передачі з ведучою ланкою – епіциклом:

$$\omega_{вд} = \frac{\omega_{вч} (u_{13}^{(4)})^n + \sum_{i=1}^n \left(\omega_{1(i)} (u_{13}^{(4)})^{n-i} (1 + u_{13}^{(4)})^{i-1} \right)}{(1 + u_{13}^{(4)})^n}. \quad (13)$$

Залежності (12) і (13) справедливі як для односходкових ($n = 1$) так і багатосходкових однорядних диференціальних передач з однаковими передаточними відношеннями $u_{13}^{(4)}$ кожної сходки.

Висновки. На основі проведених теоретичних досліджень кінематичних параметрів пристроїв для керування змінами швидкості у вигляді багатосходкових диференціальних передач з замкнутими гідросистемами можна зробити наступні висновки:

1. Отримані графічні залежності між кутковими швидкостями ведучої, веденої та керуючої ланок у багатосходкових зубчастих диференціальних передачах з замкнутими гідросистемами за допомогою засобів комп'ютерного моделювання, подані на рис. 3, 4, 5 і 7 наочно підтверджують можливість розширення діапазону керування змінами куткової швидкості між ведучою і веденою ланками при зміні куткової швидкості сонячного зубчастого колеса.

2. Запропонована методика теоретично-комп'ютерного дослідження залежності між швидкостями в багатосходковій зубчастій диференціальній передачі з

замкнутими гідросистемами між ведучою і веденою ланками, коли керування виконується через сонячне зубчасте колесо може бути застосована для різноманітних схем зубчастих диференціальних передач.

3. Отримані графічні залежності швидкості між ланками в багатосходінковій зубчастій диференціальній передачі можна використовувати при проектуванні нових пристроїв для керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач з замкнутою гідросистемою, та може бути підґрунтям для подальших досліджень механічних засобів машинознавства.

Список літератури

1. Стрілець О. Керування змінами швидкості за допомогою зубчастої диференціальної передачі / О. Стрілець, В. Стрілець, І. Шукаренко // "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. 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. – № 3. – С. 70–78.
4. Стрілець О. Р. Обґрунтування можливості керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач / О. Р. Стрілець // Вісник Інженерної академії України. – Київ : НАУ, 2015. – № 2. – С. 177–181.
5. Стрілець О. Р. Керування змінами швидкості за допомогою зубчастої диференціальної передачі через епіцикл / О. Р. Стрілець // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – № 4 (80), 2015. – С. 129–135.
6. Стрілець О. Р. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через сонячне зубчасте колесо / О. Р. Стрілець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – № 5, 2015. – С. 68–72.
7. Стрілець О. Р. Керування змінами швидкості за допомогою неповної диференціальної передачі через сателіт / О. Р. Стрілець // Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки. – Рівне : НУВГП, 2015. – № 3, ч. 2. – С. 138–148.
8. Стрілець О. Р. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через водило / О. Р. Стрілець // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2015. – Вип. 6/2015 (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. Стрилец, В. Н. Стрелец // Международный инженерный журнал "Приводы и компоненты машин". – Москва, 2015. – № 6. – С. 3–6.
10. Стрілець О. Р. Пат. 18587 Україна, МПК F16H3/00. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості / О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – опубл. 15.11.06, Бюл. № 11, 2006 р.
11. Стрілець О. Р. Пат. 25335 Україна, МПК F 16 H 1/28. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості / О. Р. Стрілець; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – опубл. 19.08.07, Бюл. № 12, 2007 р.

12. Стрілець О. Р. Пат. 28489 Україна, МПК B60/K17/06. Планетарна коробка передач / О. Р. Стрілець; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – опубл. 10.12.07, Бюл. № 20, 2007 р.

References (transliterated)

1. Strilets O., Strilets V., Shynkarenko I. Keruvannya zminyamy shvydkosti za dopomohoyu zubchastoyi dyferentsial'noyi peredachi [Speed changes management via epicyclic gear train]. *Mashynoznavstvo* [Mechanical Engineering]. Lviv, 2007, no. 6 (120), pp. 38–41.
2. Strilets O. Komp'yuterne modelyuvannya dyferentsial'nykh peredach z prystroyem dlya keruvannya shvydkisty [Computer modeling of epicyclic gear trains with speed management device]. *Mashynoznavstvo* [Mechanical Engineering]. Lviv, 2009, no. 12 (150), pp. 39–43.
3. Malashchenko V. O., Strilets O. R., Strilets V. M. Klyasyfikatsiya sposobiv i prystroyiv keruvannya protsesom zminy shvydkosti u tekhnitsi [Classification of methods and devices of the speed change process management in engineering]. *Pidyomno-transportna tekhnika* [Hoisting and Transport Machinery]. Odessa, 2015, no. 3, pp. 70–78.
4. Strilets O. R. Obgruntuвання mozhlyvosti keruvannya zminyamy shvydkosti za dopomohoyu dyferentsial'nykh peredach [Justification of the speed change management capability via differential gearbox]. *Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy* [Bulletin of Engineering Academy of Ukraine]. Kyiv, NAU Publ., 2015, iss. 2, pp. 177–181.
5. Strilets O. R. Keruvannya zminyamy shvydkosti za dopomohoyu zubchastoyi dyferentsial'noyi peredachi cherez epitsykl [Speed change management via epicyclic gear train through epicycle] *Visnyk Ternopil's'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu* [Scientific Journal of Ternopil National Technical University]. Ternopil, 2015, no. 4 (80), pp. 129–135.
6. Strilets O. R. Keruvannya protsesom zminy shvydkosti za dopomohoyu dyferentsial'noyi peredachi cherez sonyachne zubchaste koleso [Speed change process management via epicyclic gear train through sun gear]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Herald of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences]. Khmelnytsky, 2015, no. 5, pp. 68–72.
7. Strilets O. R. Keruvannya zminyamy shvydkosti za dopomohoyu nepovnoyi dyferentsial'noyi peredachi cherez satelit [Speed Change Management Via Partial Epicyclic Gear Train Through Planets]. *Visnyk natsional'noho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya. Tekhnichni nauky* [Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering]. Rivne, 2015, no. 3, vol. 2, pp. 138–148.
8. Strilets O. R. Keruvannya protsesom zminy shvydkosti za dopomohoyu dyferentsial'noyi peredachi cherez vodylo [Processes of Speed Change Management Via Epicyclic Gear Train By Carrier] *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrograds'koho* [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University]. Kremenchuk, 2015, iss. 6/2015 (95), pp. 72–77.
9. Malashchenko V. O., Strilets O. R., Strilets V. M. Novyy spobob besstupenchatogo izmeneniya skorosti pri pomoshhi zubchatyh differentsial'nykh peredach s zamknuтой gidrosistemoj [New Method of Continuously Variable Speed Change Via Epicyclic Gear Train With a Closed Hydrosystem]. *Mezhdunarodnyy inzhenernyy zhurnal "Privody i komponenty mashin"* [International Engineering Journal "Drives And Elements of Machines"]. Moscow, 2015, no. 6, pp. 3–6.
10. Strilets O. R., Strilets V. M. *Zubchastyy dyferentsial z prystroyem dlya keruvannya zminyamy shvydkosti* [Epicyclic gear train with speed change management device]. Patent UA, no. 18587, 2006.
11. Strilets O. R. *Zubchastyy dyferentsial z prystroyem dlya keruvannya zminyamy shvydkosti* [Epicyclic gear train with speed change management device]. Patent UA, no. 25335, 2007.
12. Strilets O. R., Strilets V. M. *Zubchastyy dyferentsial z prystroyem dlya keruvannya zminyamy shvydkosti* [Planetary gearbox]. Patent UA, no. 28489, 2007.

Надійшла (received) 18.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Керування змінами швидкості за допомогою багатосходінкової зубчастої диференціальної передачі через сонячне зубчасте колесо / В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. М. Стрілець // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 87–92. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0791.

Управление изменениями скорости при помощи многоступенчатой зубчатой дифференциальной передачи через солнечное зубчатое колесо / В. О. Малащенко, О. Р. Стрилец, В. М. Стрелец // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 87–92. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0791.

Speed change management via multistep epicyclic gear train by the sun gear / V. O. Malashchenko, O. R. Strilets, V. M Strilets // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 23 (1195). – P. 87–92. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0791.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Малащенко Володимир Олександрович – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", завідувач кафедри деталей 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 кафедрой деталей 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 Machine Elements; 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.

Стрелец Олег Романович – кандидат технических наук, Национальный университет водного хозяйства и 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.), 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) 24-67-00; e-mail: v.m.strilets@nuwm.edu.ua.

Стрелец Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики, инженерной графики и машиноведения Национального университета водного хозяйства и природопользования, г. Ровно; тел.: (0362) 24-67-00; 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) 24-67-00; e-mail: v.m.strilets@nuwm.edu.ua.

УДК 621.83

М. В. МАРГУЛИС, Я. О. ГОРДИЕНКО

РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВОЛНОВЫХ ПРЕЦЕССИОННЫХ ПЕРЕДАЧ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

Запропоновано оптимізовану методику розрахунку хвильових прецесійних передач з тілами кочення. Методика комплексно враховує особливості геометрії передач, матеріали, твердість поверхневого шару основних ланок і раціональну довговічність передач. Геометричні параметри періодичних доріжок кочення і тіл кочення оптимізовані за критерієм мінімальних контактних напружень і втрат на тертя. Наведено приклад розрахунку.

Ключові слова: хвильова передача, періодична доріжка кочення, тіло кочення, кут нутації, ковзання, оптимізація, прецесія.

Предложена оптимизированная методика расчета волновых прецессионных передач с телами качения. Методика комплексно учитывает особенности геометрии передач, используемые материалы, твердость поверхностного слоя основных звеньев и рациональную долговечность передач. Геометрические параметры периодических дорожек качения и тел качения оптимизированы по критерию минимальных контактных напряжений и потерь на трение. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: волновая передача, периодическая дорожка качения, тело качения, угол нутации, скольжение, оптимизация, прецессия.

Optimized methodics of calculation of harmonic precessional drives with rolling elements is given. This complex considers the specifics of geometry of transmission, used materials, surface hardness of master links and rational durability of transmission. The geometric parameters of periodic race grooves and rolling elements are optimized by minimum contact stress and friction lost. The example calculation is given. The technique developed in addition to the analytical options presented in tabular and graphical form, where the unknown quantities are determined by the presented graphs and tables, allowing you to reduce the time to payment mechanism

Keywords: harmonic drive, periodic race groove, rolling element, nutation angle, sliding motion, optimization, precession.

Введение. Актуальность задачи. Известно, что волновые передачи с телами качения (ВПТК) являются наиболее экономичной разновидностью волновых передач по массогабаритным параметрам и КПД. Это достигается заменой волнового зубчатого зацепления шаровым, практически исключающим трение скольжения и повышающим КПД (за счет исключения потерь в вол-

новом зубчатом зацеплении и генераторе волн) и надежность передачи (за счет исключения гибких звеньев). В связи с этим актуальным является вопрос разработки оптимизированной методики расчета ВПТК, оптимизированных по критериям минимальной массы, максимального КПД и долговечности.

© М. В. Маргулис, Я. О. Гордиенко, 2016