

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

*Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра деталей машин,

**Національний університет водного господарства та природокористування,
кафедра теоретичної механіки, інженерної графіки та машинознавства

КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ МАШИН БАГАТОСТУПЕНЕВОЮ ЗУБЧАСТОЮ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЧЕРЕЗ ЕПІЦИКЛ

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

Розглянуто процес керування змінами швидкості за допомогою багатосходинкових зубчастих диференціальних передач із замкненою гідросистемою, коли ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а веденою – водило, або навпаки. Керуючою ланкою є епіцикл, пов'язаний із замкненою гідросистемою, до складу якої входять гідронасос, короткі трубопроводи, регулювальний дросель і зворотний клапан. Коли регулювальний дросель відкритий, то гідронасос знаходиться з епіциклом у русі, а коли закритий, вони зупинені. Отже, залежно від пропускної здатності регулювального дроселя швидкість епіцикла змінюється і тому змінюється швидкість водила. Виконання зубчастої диференціальної передачі багатосходинковою дає змогу збільшити діапазон зміни швидкостей. За допомогою комп'ютерного моделювання отримані графічні залежності між швидкостями ведучої, керуючої та веденої ланок у таких пристроях.

Ключові слова: зміна швидкості, диференціальна передача, гідросистема, епіцикл.

The article considers processes of speed change management via epicyclic gear train with a closed circuit hydrosystem when the driving element is a sun gear and the driven - is a carrier or vice versa. The control element is ring gear connected to closed circuit hydrosystem that consists of pump, pipes and regulating throttle. When throttle valve is open, we have that ring gear drives the hydraulic pump that pumps fluid in a closed hydrosystem, so the control element is in motion. When throttle is closed, then hydrosystem is immovable, hydraulic pump is stopped and so is ring gear. Thus, depending on the bandwidth of regulating throttle, speed of ring gear changes, while changing the speed of the driven element (carrier or solar gear). Having a multistep gear train gives a broader range of speed change. We have received graphic dependences between velocities of driving, control and driven elements by means of computer programming.

Key words: speed change, epicyclic gear train, hydrosystem, ring gear.

Постановка проблеми. Під час виконання робіт машинами у різних галузях промисловості та забезпечення технологічних процесів виникає необхідність керування змінами швидкості за величиною та напрямком її виконавчих механізмів. У вітчизняній [1–8] і зарубіжній [9] періодичній технічній літературі запропонований новий безсходинковий спосіб керування змінами швидкості за допомогою односходинкових однорядних і дворядних зубчастих диференціальних передач із замкненою гідросистемою. Однак при цьому часто не забезпечується діапазон зміни швидкостей.

Для розширення діапазону регулювання зміни швидкості у приводі за рахунок зубчастої диференціальної передачі з пристроєм для керування змінами швидкості у вигляді замкненої гідросистеми пропонується виконувати зубчасту диференціальну передачу багатосходинковою – з двох або більше сходинок, з'єднаних між собою. Такі передачі розроблені на рівні патентів України

[10–12] і потребують подальших теоретичних досліджень їх кінематичних, силових та геометричних параметрів.

Мета роботи – виконати теоретично-комп’ютерне дослідження залежності процесу зміни швидкості за допомогою багатосходиноквої диференціальної передачі із замкненими гідросистемами між ведучою ланкою (сонячне зубчасте колесо першої сходинок) і веденою (води́ло n -ї сходинок), або навпаки, коли керування виконуються через епіцикли.

Основний матеріал. На рис. 1, а показано схему багатосходиноквої диференціальної передачі, в якій води́ло першої сходинок $4_{(1)}$ з’єднане з сонячним зубчастим колесом $1_{(2)}$ другої сходинок, води́ло другої сходинок $4_{(2)}$ з’єднане з сонячним зубчастим колесом $1_{(3)}$ третьої сходинок і т. д., а керування швидкістю здійснюється за рахунок епіциклів першої $3_{(1)}$, другої $3_{(2)}$, третьої $3_{(3)}$, ..., n -ї сходинок $3_{(n)}$ за допомогою встановлених на них замкнених гідросистем $б_{(1)}$, $б_{(2)}$, $б_{(3)}$, ..., $б_{(n)}$. Ведучою ланкою такої багатосходиноквої диференціальної передачі є сонячне зубчасте колесо $1_{(1)}$ першої сходинок, а веденою ланкою – води́ло $4_{(n)}$ n -ї сходинок. Замкнені гідросистеми $б_{(1)}$, $б_{(2)}$, $б_{(3)}$, ..., $б_{(n)}$ (рис. 1, б) однакові за будовою, розміщені на корпусі 5 і з’єднані з епіциклами через зубчасті передачі $7_{(1)}$, $7_{(2)}$, $7_{(3)}$, ..., $7_{(n)}$. Замкнена гідросистема, будова та робота якої детально описані в [1], містять шестеренчастий гідронасос, короткі трубопроводи, регульовальний дросель, зворотний клапан і сміть для рідини. Керування зміною швидкості здійснюється за рахунок дроселювання рідини, яка рухається у замкнених гідросистемах.

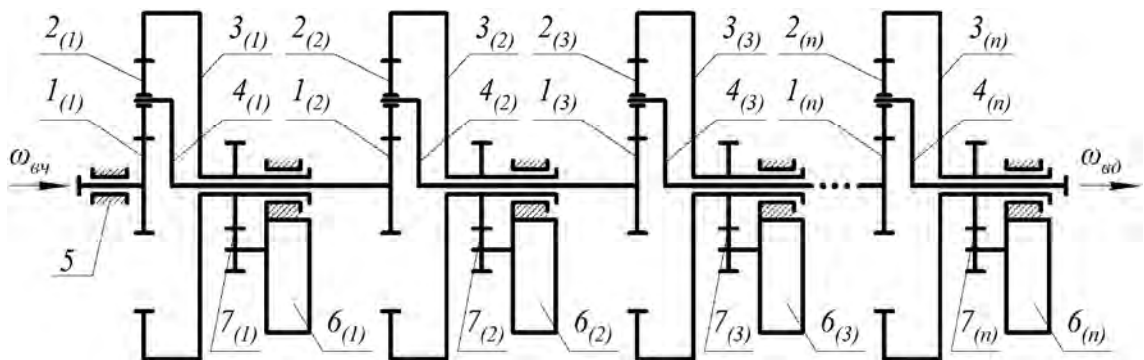


Рис. 1. Схема багатосходиноквої зубчастої диференціальної передачі з замкненими гідросистемами із керуванням швидкістю через епіцикли

Зв’язок між швидкостями веденої ланки (води́ла $4_{(n)}$) $w_{вд}$ і ведучої ланки (сонячним зубчастим колесом $1_{(1)}$) $w_{вч}$ можна отримати на основі умов, отриманих у [5], коли зв’язок між швидкостями для окремих сходинок 1, 2, 3, ..., n має такий вигляд:

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

$$w_{4(3)} = \frac{w_{1(3)} + w_{3(3)}u_{13(3)}^{(4)}}{1 + u_{13(3)}^{(4)}}; \quad \dots; \quad w_{4(n)} = \frac{w_{1(n)} + w_{3(n)}u_{13(n)}^{(4)}}{1 + u_{13(n)}^{(4)}}; \quad (1)$$

і $w_{1(2)} = w_{4(1)}; w_{1(3)} = w_{4(2)}; \dots; w_{1(n)} = w_{4(n-1)}$.

Використавши умови (1), після нескладних перетворень отримаємо

$$w_{вд} = \frac{w_{вч} + w_{3(1)}u_{13(1)}^{(4)} + \sum_{k=2}^n \left(w_{3(k)}u_{13(k)}^{(4)} \prod_{i=1}^{k-1} (1 + u_{13(i)}^{(4)}) \right)}{\prod_{i=1}^n (1 + u_{13(i)}^{(4)})}, \quad (2)$$

де $w_{3(1)}$, $w_{3(2)}$, $w_{3(3)}$, ..., $w_{3(n)}$, – швидкості зубчастих коліс – епіциклів, відповідно, першої $3_{(1)}$, другої $3_{(2)}$, третьої $3_{(3)}$, ..., n -ї $3_{(n)}$ сходинок, які є змінними за рахунок гідросистем $б_{(1)}$, $б_{(2)}$, $б_{(3)}$, ..., $б_{(n)}$:

$w_{3(1)} = 0 \dots w_{3(1)max}$; $w_{3(2)} = 0 \dots w_{3(2)max}$; $w_{3(3)} = 0 \dots w_{3(3)max}$; ...; $w_{3(n)} = 0 \dots w_{3(n)max}$; $u_{13(1)}^{(4)}$, $u_{13(2)}^{(4)}$, $u_{13(3)}^{(4)}$, ..., $u_{13(n)}^{(4)}$ – передатні числа, відповідно першої, другої, третьої, ..., n -ї сходинки. У залежностях (1) і (2)

вже враховано те, що значення передатного числа для зубчастої диференціальної передачі (рис. 1) від’ємне тому, що в окремих сходинках маємо по одному зовнішньому зачепленню:

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

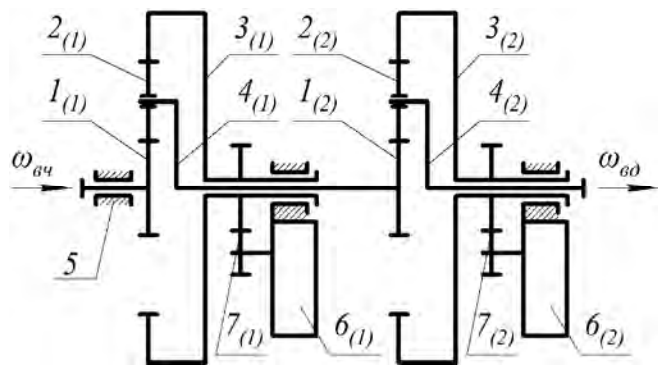
зубців сонячного зубчастого колеса, відповідно, першої, другої, третьої, ..., n -ї сходинки; $z_{3(1)}, z_{3(2)}, z_{3(3)}, \dots, z_{3(n)}$ – кількість зубців епіцикла, відповідно, першої, другої, третьої, ..., n -ї сходинки.

Якщо за ведучу ланку прийняти водило першої сходинки з кутовою швидкістю $w_{вч}$, а веденою ланкою буде сонячне зубчасте колесо n -ї сходинки з $w_{вд}$, тоді матимемо:

$$w_{вд} = w_{вч} \prod_{i=1}^n (1 + u_{13(i)}^{(4)}) - \sum_{i=1}^{n-1} \left(w_{3(i)} u_{13(i)}^{(4)} \prod_{k=i+1}^n (1 + u_{13(k)}^{(4)}) \right) - w_{3(n)} u_{13(n)}^{(4)}. \quad (3)$$

На рис. 2 показано двосходинкову диференціальну передачу, в якій водило першої сходинки $4_{(1)}$ з’єднане з сонячним зубчастим колесом $1_{(2)}$ другої сходинки, а керування швидкістю здійснюється за рахунок епіциклів першої $3_{(1)}$ і другої $3_{(2)}$ сходинки за допомогою встановлених на них замкнених гідросистем $б_{(1)}$ і $б_{(2)}$. Ведучою ланкою такої двосходинкової диференціальної передачі є сонячне зубчасте колесо $1_{(1)}$ першої сходинки, а веденою ланкою – водило $4_{(2)}$ другої сходинки.

Рис. 2. Схема двосходинкової зубчастої диференціальної передачі із замкненими гідросистемами з регулюванням через епіцикли



Використовуючи вираз 2, зв’язок між швидкостями веденої (водида $4_{(2)}$) $w_{вд}$ і ведучої ланок (сонячного зубчастого колеса $1_{(1)}$) $w_{вч}$ має такий вигляд:

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

Для того, щоб наочніше показати характер зміни швидкості, розглянемо двосходинкову зубчасту диференціальну передачу з пристроями у вигляді замкнених гідросистем, у якій передатні числа $u_{13(i)}^{(4)}$ рівні для обох сходинки $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)}$, а кутова швидкість епіцикла другої сходинки $w_{3(2)} = 0$. Для такої передачі матимемо

$$w_{вд} = \frac{w_{вч} + w_{3(1)} u_{13}^{(4)}}{(1 + u_{13}^{(4)})^2}. \quad (5)$$

Формула (5) була запрограмована та отримані графічні залежності $w_{вд} = f(w_{3(1)}, w_{3(2)}, w_{вч}, u_{13}^{(4)})$ за різних передатних відношень $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13}^{(4)} = 1..10$ та кутової швидкості ведучої ланки $w_{вч} = 100 \text{ рад/с}$. Отримані графічні залежності показано на рис. 3.

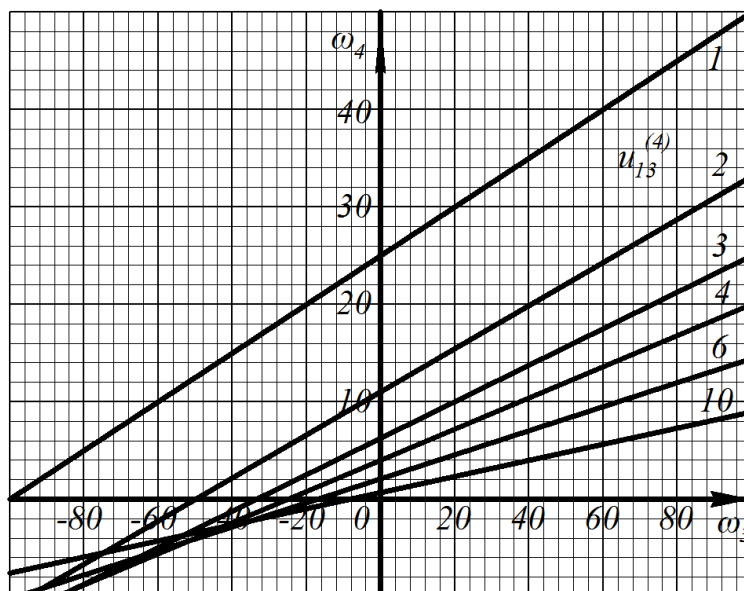


Рис. 3. Залежності $w_{\omega\delta} = f(w_{3(1)}, w_{3(2)}, w_{\omega\gamma}, u_{13}^{(4)})$
за $w_{\omega\gamma} = 100 \text{ рад/с}$ і $w_{3(2)} = 0$ і $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$

Задавшись тими самими даними для випадку, коли ведуча ланка – водило, а ведена – сонячне зубчасте колесо, з виразу (3) матимемо

$$w_{\omega\delta} = w_{\omega\gamma} \left(1 + u_{13}^{(4)}\right)^2 - w_{3(1)} u_{13}^{(4)}, \quad (6)$$

де $w_{\omega\delta}$ – швидкість сонячного зубчастого колеса; $w_{\omega\gamma}$ – швидкість водила.

Запрограмувавши вираз (6) за допомогою комп'ютерного моделювання, отримаємо графічні залежності між швидкостями $w_{\omega\delta}$ сонячного зубчастого колеса і $w_{\omega\gamma}$ водила (рис. 4).

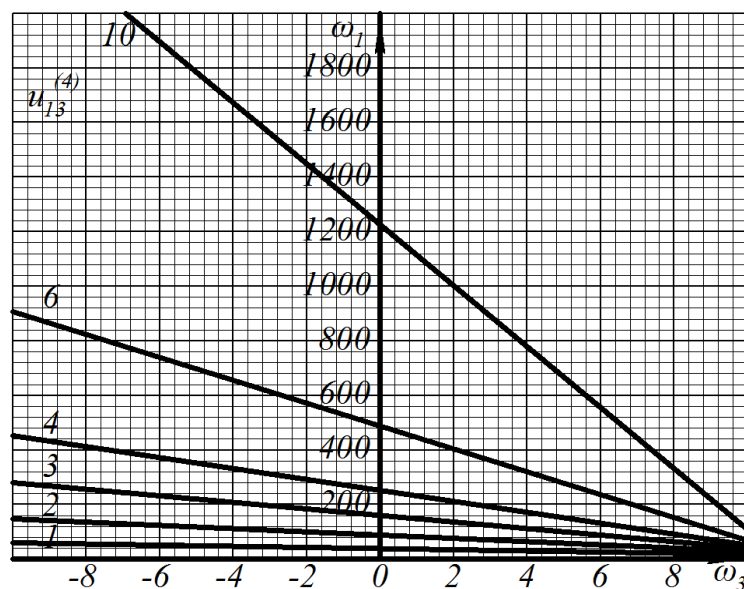


Рис. 4. Залежності $w_{\omega\delta} = f(w_{3(1)}, w_{3(2)}, w_{\omega\gamma}, u_{13}^{(4)})$
за $w_{\omega\gamma} = 10 \text{ рад/с}$ і $w_{3(2)} = 0$ і $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$

Далі, на рис. 5 показано трисходинову зубчасту диференціальну передачу, в якій водило першої сходинки $4_{(1)}$ з'єднане з сонячним зубчастим колесом $1_{(2)}$ другої сходинки, водило другої

сходинки 4₍₂₎ з'єднане з сонячним зубчастим колесом 1₍₃₎ третьої сходинок, а керування швидкістю здійснюється за рахунок зубчастих коліс – епіциклів першої 3₍₁₎, другої 3₍₂₎ і третьої 3₍₃₎ сходинок за допомогою встановлених на них замкнених гідросистем б₍₁₎, б₍₂₎. і б₍₃₎. Ведучою ланкою такої трисходиноквої диференціальної передачі є сонячне зубчасте колесо 1₍₁₎ першої сходинок, а веденою ланкою – водило 4₍₃₎ третьої сходинок.

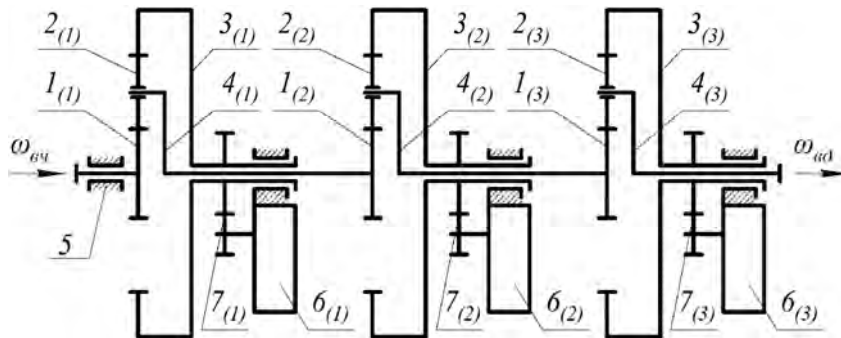


Рис. 5. Схема трисходиноквої зубчастої диференціальної передачі із замкненими гідросистемами з регулюванням через епіцикли

Із виразу (2) для трисходиноквої передачі отримуємо зв'язок між швидкостями веденої ланки (води́ла 4₍₃₎) $w_{вд}$ і ведучої ланки (сонячного зубчастого колеса 1₍₁₎) $w_{вч}$:

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

Величини, які входять у формулу (7), були пояснені вище.

Для наочності характеру зміни швидкості через пристрій, що розглядається, задамося вихідними даними: $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13(3)}^{(4)} = u_{13}^{(4)} = 1..10$, $w_{3(2)} = 0$, $w_{3(3)} = 0$. Для такого випадку:

$$w_{вд} = \frac{w_{вч} + w_{3(1)}u_{13}^{(4)}}{(1 + u_{13}^{(4)})^3}. \quad (8)$$

Формула (8) запрограмована та отримано графічні залежності $w_{вд} = f(w_{3(1)}, w_{3(2)}, w_{3(3)}, w_{вч}, u_{13}^{(4)})$.

На рис. 6 показані графічні залежності за $w_{вч} = 100 \text{ рад/с}$.

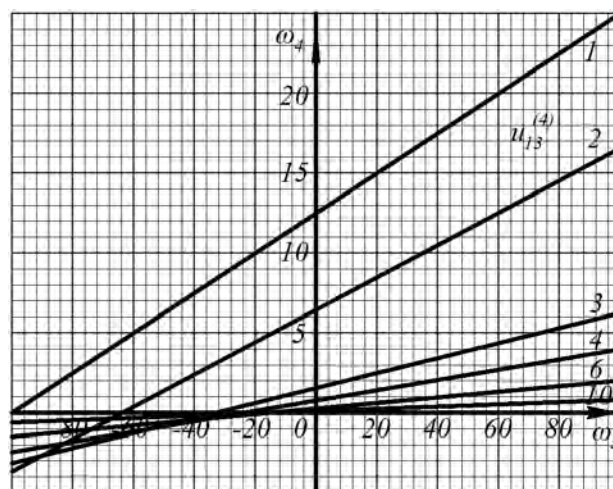


Рис. 6. Залежності $w_{вд} = f(w_{3(1)}, w_{3(2)}, w_{3(3)}, w_{вч}, u_{31}^{(4)})$

за $w_{вч} = 100 \text{ рад/с}$ і $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13(3)}^{(4)} = 1..10$

Якщо за ведучу ланку прийняти водило, а веденою ланкою буде сонячне зубчасте колесо, тоді з виразу (3) для аналогічних у попередньому випадку вихідних даних матимемо

$$w_{\delta 0} = w_{\delta 4} \left(1 + u_{13}^{(4)}\right)^3 - w_{3(1)} u_{13}^{(4)}. \quad (9)$$

У (9) $w_{\delta 0}$ – швидкість сонячного зубчастого колеса, а $w_{\delta 4}$ – швидкість водила.

На основі запрограмованого виразу (9) отримані графічні залежності, показані на рис. 7.

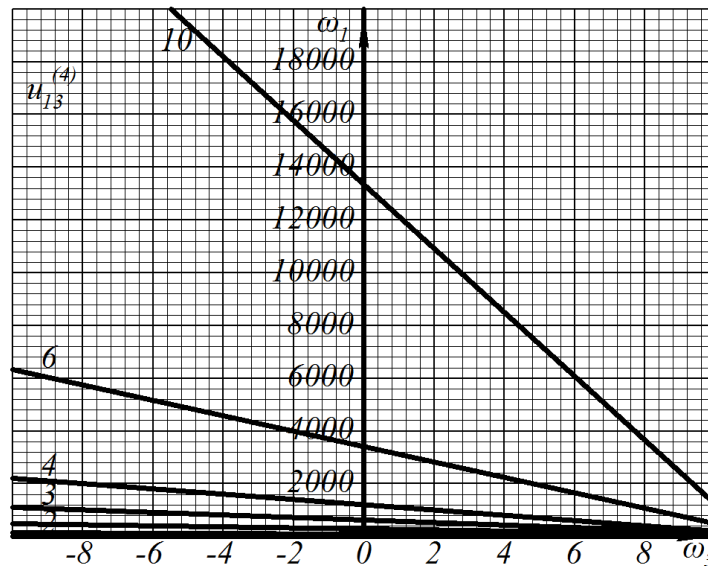


Рис. 7. Залежності $w_{\delta 0} = f(w_{3(1)}, w_{3(2)}, w_{3(3)}, w_{\delta 4}, u_{13}^{(4)})$

за $w_{\delta 4} = 10 \text{ рад/с}$ і $u_{13(1)}^{(4)} = u_{13(2)}^{(4)} = u_{13(3)}^{(4)} = 1 \dots 10$

Висновки: 1. Отримані графічні залежності швидкості між ведучою і веденою ланками (сонячним зубчастим колесом і водилом, або навпаки) у багатосходинкових зубчастих диференціальних передачах із замкненими гідросистемами за допомогою засобів комп'ютерного моделювання, показані на рис. 3, 4, 6 і 7, наочно підтверджують, що розширюється діапазон зміни швидкості між ведучою і веденою ланками за зміни швидкостей епіциклів.

2. Запропонована методика теоретично-комп'ютерного дослідження залежності між швидкостями у багатосходинковій зубчастій диференціальній передачі із замкненими гідросистемами між ведучою (сонячне зубчасте колесо) і веденою (водило) ланками, або навпаки, коли керування виконується через епіцикли, може бути застосована для інших схем.

3. Отримані графічні залежності швидкості між ланками у багатосходинковій зубчастій диференціальній передачі можна використовувати під час проектування таких нових пристроїв для керування змінами швидкості.

1. Стрілець О. Керування змінами швидкості за допомогою зубчастої диференціальної передачі / О. Стрілець, В. Стрілець, І. Шинкаренко // *Машинознавство*. – 2007. – № 6 (120). – С. 38–41.

2. Стрілець О. Комп'ютерне моделювання диференціальних передач з пристроєм для керування швидкістю / О. Стрілець // *Машинознавство*. – 2009. – № 12 (150). – 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. – №1. – С. 70–78.

4. Стрілець О. Р. Обґрунтування можливості керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач / О. Стрілець // *Вісник Інженерної академії України*. – К.:

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. – 2015. – № 4 (80). – 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. – 2015. – № 5. – 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. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 6/2015 (95). – С. 72–77. 9. Малащенко В. А. Новый способ безступенчатого 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”. – 2015. – № 6. – С. 3–6. 10. Пат. 18587 Україна, МПК F16H3/00. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості / Стрілець О. Р., Стрілець В. М.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – и №2006 05205; заявл. 12.05.06; опубл. 15.11.06, Бюл. № 11, 2006 р. 11. Пат. 25335 Україна, МПК F 16 H 1/28. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості / Стрілець О. Р.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – и № 2005 04847; заявл. 23.01.07; опубл. 19.08.07, Бюл. № 12. 12. Пат. 28489 Україна, МПК В60/К17/06. Планетарна коробка передач / Стрілець О. Р.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – и № 2007 09132; заявл. 09.08.07; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20, 2007 р.