

3. Гутаревич, Ю.Ф. Випробування двигунів внутрішнього згорання [Текст] / Ю.Ф. Гутаревич, А.О. Корпач. – К.: НТУ, 2002. – 191 с.
4. Кирилин, В.А. Техническая термодинамика [Текст] / В.А. Кирилин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Наука, 1979. – 512 с.
5. Основы практической теории горения [Текст] / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов, Ю.А. Рундыгин и др; учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – Л.: Энергия, 1973. – 264 с.
6. Кутенев, В.Ф. Аксиально-поршневые двигатели с переменной степенью сжатия и рабочим объемом [Текст] / В.Ф. Кутенев, А.И. Яманин, М.А. Зленко.– М.: Изд-во НАМИ, 2000. – 304 с.
7. Economy and NO emission potential of an SI variable R/L engine. Rychter T,J., Teodrczyk A. «SAE Techn. Pap. Ser.», 1985, No.850207, 14 pp.
8. Contraction Specialties of Regenerative Piston Internal Combustion Engines. Pavletic Radislav, Prebil Ivan, Vuksapovic Bozidar, Zgonik Miran. «SAE Techn. Pap. Ser.», 1986, No. 861193, 1 – 6.
9. Economy and NO emission potential of an SI variable R/L engine. Rychter T,J., Teodrczyk A. «SAE Techn. Pap. Ser.», 1985, No.850207, 14 pp.

Отримано 25.11.2015

УДК 621.833.65

**Олег Стрілець, канд. техн. наук**

*Національний університет водного господарства та природокористування*

## **КЕРУВАННЯ ЗМІНАМИ ШВИДКОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ЕПІЦИКЛ**

**Резюме.** Розглянуто процес керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі з замкнутою гідросистемою, коли ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а веденою – водило або навпаки. Керуючою ланкою є епіцикл, пов'язаний з замкненою гідросистемою, до складу якої входять гідронасос, трубопроводи і регулювальний дросель. Коли регулювальний дросель відкритий, зубчасте колесо-епіцикл через зубчасту передачу приводить у рух гідронасос, який перекачує рідину в замкненій гідросистемі. Якщо регулювальний дросель закритий, тоді замкнена гідросистема закрита, тобто гідронасос зупинений і, при цьому, зупинене зубчасте колесо- епіцикл. Таким чином, залежно від пропускної здатності регулювального дроселя швидкість зубчастого колеса-епіцикла змінюється і тому змінюється швидкість веденої ланки. За допомогою комп'ютерного моделювання отримано графічні залежності між швидкостями ведучої, керуючої та веденої ланок.

**Ключові слова:** керування швидкістю, диференціальна передача, сонячне зубчасте колесо, епіцикл, водило, замкнена гідросистема.

**Oleh Strilets**

## **SPEED CHANGE MANAGEMENT VIA DIFFERENTIAL GEAR THROUGH EPICYCLE**

**Summary.** The article considers processes of continuously variable speed change management via differential transmission with a closed hydrosystem when the driving element is a solar gear and the driven - is carrier or vice versa.

The author has investigated the case when the control element of the transmission is the epicycle connected to closed hydrosystem. When the driving element is the sun gear, driven - is carrier and the management of carrier's speed is performed by changing the speed of epicycle gear, we have that epicycle 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 epicycle. The same goes for the case of driving carrier and driven solar gear. Thus, depending on the bandwidth of regulating throttle, speed of epicycle gear changes from zero point to certain

*maximum value, while changing the speed and possibly rotation direction of the driven element (carrier or solar gear). The value and direction of driven element velocity depends on construction of differential gear itself and bandwidth of regulating throttle.*

*Results of the paper are the analytical dependences obtained between velocities of driving, control and driven elements of differential gear and graphic reproduction of these dependences by means of computer programing in form of charts.*

*For the first time theoretical research of the speed change process taking place in differential gear with closed hydrosystem have been conducted.*

*Obtained dependences prove the possibility of speed management via differential transmission with a closed hydrosystem and can be used in constructing of new speed changes management devices that include differential gear and closed hydrosystem.*

**Key words:** *speed management, differential gear, sun gear, epicycle, carrier, closed hydrosystem.*

**Постановка проблеми.** При виконанні робіт у різних галузях промисловості й забезпечення різних технологічних процесів виникає необхідність керування процесами зміни швидкості у техніці за величиною та напрямком її виконавчих механізмів. У вітчизняній і зарубіжній техніці широко відомі способи і пристрої сходового та безсходового керування швидкістю за величиною та напрямком у вигляді сходових та безсходових коробок передач. Відомі способи керування змінами швидкості мають багато недоліків. Основними недоліками сходового керування швидкістю є складність конструкції пристроїв, їх велика матеріаломісткість, великі динамічні навантаження, які виникають при переході з однієї швидкості на іншу, навіть із використанням синхронізаторів. Для безсходового керування швидкістю характерне велике спрацювання деталей за рахунок використання фрикційних зв'язків, як правило, фрикційних гальм та блокувальних фрикційних муфт. Унаслідок цього зменшується довговічність і надійність деталей приводів і машин у цілому. Тому виникають завдання створення нових способів і пристроїв керування змінами швидкості, які усувають згадані недоліки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом виконано огляди і проведено широкий аналіз способів і пристроїв для керування процесом зміни швидкості [1 – 6], запропоновано класифікацію способів і пристроїв для керування процесом зміни швидкості [7], обґрунтовано можливість керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач [8], розроблено нові пристрої на рівні патентів [9 – 12] для безсходового керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач з замкненою гідросистемою. Однак теоретичні та експериментальні дослідження для нового способу і пристроїв досі не проведені.

**Мета роботи.** Виконати теоретично-комп'ютерне дослідження залежності процесу зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі з замкненою гідросистемою між ведучою ланкою (сонячне зубчасте колесо) і веденою (води́ло), або навпаки, коли керування виконується через епіцикл.

**Результати дослідження.** Одна зі схем рядного диференціального механізму з пристроєм для керування змінами швидкості показана на рис.1 *a* і *б* складається з сонячного зубчастого колеса 1, сателітів 2, опорного зубчастого колеса-епіцикла 3 і води́ла 4, розміщених у корпусі 5. На корпусі 5 розміщена замкнена гідросистема 6, яка пов'язана з валом епіцикла 3 зубчастою передачею 7. Замкнена гідросистема 6 складається з гідронасоса 8, трубопроводів 9, регулювального дрoселя 10, зворотного клапана 11 і ємності для рідини 12.

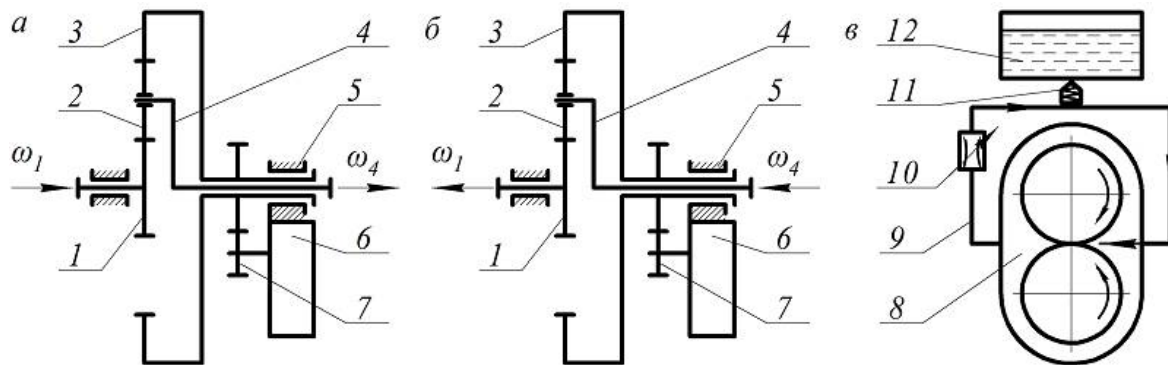


Рисунок 1. Схеми: зубчастої диференціальної передачі з керуванням через епіцикл та ведучою ланкою сонячним колесом (а) або водилом (б); в – замкненої гідросистеми

Figure 1. Schemes of differential transmission with management via epicycle and driving element – the sun gear (a) or the carrier (b); в – a closed hydrosystem

Розглянемо випадок, коли ведучою ланкою буде сонячне зубчасте колесо 1, а веденою – водило 4 (рис. 1 а). Керування зміною веденої ланки – водила 4 здійснюється через епіцикл 3. Якщо прийняти кутову швидкість ведучої ланки 1 за  $\omega_1 = const$ , тоді за рахунок зміни швидкості колеса-епіцикла 3 ( $\omega_3 = var$ ) за допомогою замкненої гідросистеми 6 можна плавно змінювати швидкість веденої ланки – водила 4 ( $\omega_4$ ). Маємо те, що зубчасте колесо-епіцикл 3 через зубчасту передачу 7 приводить у рух шестерінчастий гідронасос 8, який перекачує рідину в замкненій гідросистемі 6, складеній з трубопроводів 9 і регульовального дроселя 10 – коли регульовальний дросель 10 відкритий. Якщо регульовальний дросель 10 закритий, тоді замкнена гідросистема 6 закрита, тобто шестерінчастий гідронасос 8 зупинений і, при цьому, зубчасте колесо-епіцикл 3 зупинене ( $\omega_3 = 0$ ). Таким чином, залежно від пропускної здатності регульовального дроселя 10 швидкість зубчастого колеса-епіцикла 3 ( $\omega_3$ ) змінюється від 0 до  $\omega_{3max}$  і, при цьому, змінюється швидкість водила 4 ( $\omega_4$ ). Зв'язок між швидкостями в такій передачі описується відомим аналітичним виразом [15, 16]

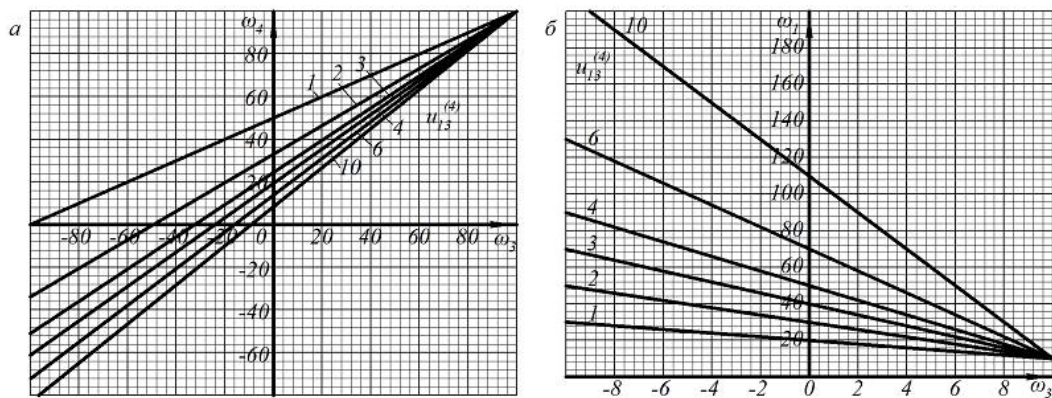
$$\omega_4 = \frac{\omega_1 - \omega_3 u_{13}^{(4)}}{1 - u_{13}^{(4)}}, \quad (1)$$

де  $u_{13}^{(4)}$  – передаточне відношення механізму від сонячного зубчастого колеса 1 до епіцикла 3 при зупиненому водилі 4. Для схем на рис. 1  $u_{13}^{(4)} = -(z_3 / z_1)$ , де  $z_1$  – число зубів сонячного зубчастого колеса;  $z_3$  – число зубів епіцикла. Знак (-) тому, що у передачі є одне зовнішнє (колеса 1 – 2) зачеплення. Таким чином, врахувавши від'ємне значення передаточного відношення  $u_{13}^{(4)}$ , вираз (1) для розглянутої схеми матиме остаточний вигляд

$$\omega_4 = \frac{\omega_1 + \omega_3 u_{13}^{(4)}}{1 + u_{13}^{(4)}}. \quad (2)$$

Для того, щоб наочніше показати характер зміни швидкості через диференціальну передачу з пристроєм у вигляді замкненої гідросистеми, формула (2)

запрограмована на комп'ютері та отримано графічні залежності  $\omega_4 = f(\omega_3, \omega_1, u_{13}^{(4)})$ , при різних передаточних числах  $u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$  та кутовій швидкості ведучої ланки  $\omega_1 = 100 \text{ рад/с}$ . Отримані графічні залежності  $\omega_4 = f(\omega_3, \omega_1, u_{13}^{(4)})$  показані на рис.2 а.



**Рисунок 2.** Залежності  $\omega_4 = f(\omega_3, \omega_1, u_{13}^{(4)})$ , при  $u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$  і:

а –  $\omega_1 = 100 \text{ рад/с}$  для схеми на рис. 1 а; б –  $\omega_1 = 10 \text{ рад/с}$  для схеми на рис. 1 б

**Figure 2.** Graphical dependences  $\omega_4 = f(\omega_3, \omega_1, u_{13}^{(4)})$ , where  $u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$  and:

а –  $\omega_1 = 100 \text{ рад/с}$  for the scheme on fig. 1 а; б –  $\omega_1 = 10 \text{ рад/с}$  for the scheme on fig. 1 б

Якщо ж прийняти водило 4 за ведучу ланку (рис. 1 б) з кутовою швидкістю  $\omega_4 = \text{const}$ , тоді за рахунок зміни швидкості зубчастого колеса-епіцикла 3  $\omega_3 = \text{var}$  за допомогою замкненої гідросистеми 6 можна плавно змінювати швидкість веденої ланки, сонячного зубчастого колеса 1. У цьому випадку зубчаста диференціальна передача з пристроєм для керування зміною швидкості працює таким чином. Водило 4 через сателіт 2 приводить у рух епіцикл 3, а той через зубчасту передачу 7 приводить у рух шестерінчастий гідронасос 8, який перекачує рідину в замкненій гідросистемі 6, складеній з трубопроводів 9 і регулювального дроселя 10 – коли регулювальний дросель 10 відкритий. Якщо регулювальний дросель 10 закритий, тоді замкнена гідросистема 6 закрыта, тобто шестерінчастий гідронасос 8 зупинений і, при цьому, зубчасте колесо-епіцикл 3 зупинене  $\omega_3 = \text{var}$ . Знову ж, залежно від пропускної здатності регулювального дроселя 10, швидкість зубчастого колеса-епіцикла 3  $\omega_3$  змінюється від 0 до  $\omega_{3\text{max}}$  і, при цьому, змінюється швидкість сонячного зубчастого колеса 1  $\omega_1$ .

Формулу (2) розв'яжемо відносно  $\omega_1$ , отримаємо:

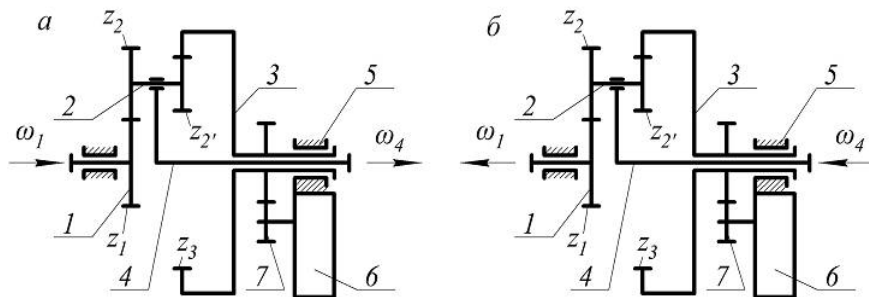
$$\omega_1 = \omega_4(1 + u_{13}^{(4)}) - \omega_3 u_{13}^{(4)}. \quad (3)$$

Для наочності характеру залежності зміни швидкості через диференціальну передачу з пристроєм у вигляді замкненої гідросистеми із формули (3) засобами комп'ютерного моделювання отримані графічні залежності  $\omega_1 = f(\omega_3, \omega_4, u_{13}^{(4)})$ , при різних передаточних відношеннях  $u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$  та кутовій швидкості ведучої ланки  $\omega_4 = 10 \text{ рад/с}$ . Отримані графічні залежності  $\omega_1 = f(\omega_3, \omega_4, u_{13}^{(4)})$  показані на рис.2 б.

Розглянемо приклади з нерядними диференціальними передачами. На рис. 3 показані нерядні диференціальні передачі, в яких сателіт 2 виконаний із двох

паралельних зубчастих коліс з числом зубів  $z_2$  і  $z_2'$ . При цьому сонячне зубчасте колесо 1 ( $z_1$ ) з сателітом 2 ( $z_2$ ) утворює зовнішнє зачеплення, а сателіт 2 ( $z_2'$ ) з епіциклом 3 ( $z_3$ ) – внутрішнє. Тоді передаточне відношення  $u_{13}^{(4)} = -\frac{z_2 z_3}{z_1 z_2'}$ . Для аналізу зміни

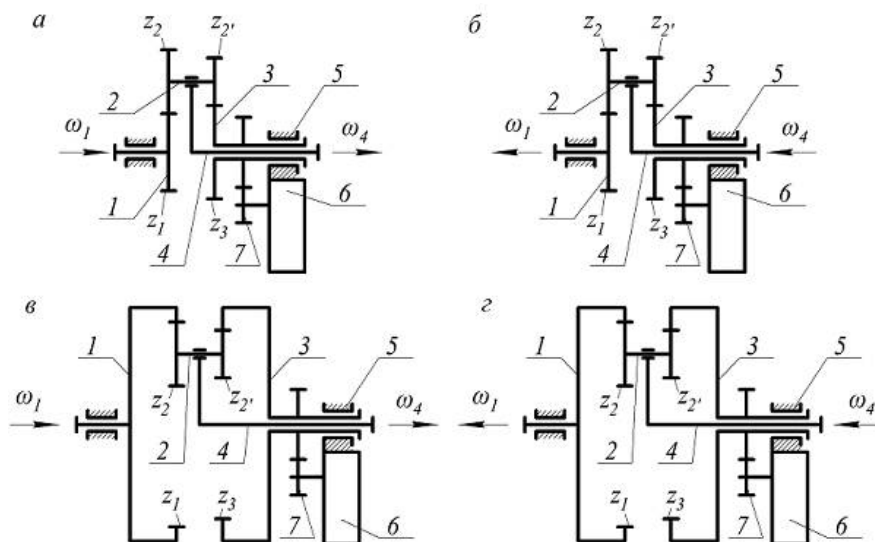
швидкості таких механізмів можна використати аналітичні вирази (2) і (3) та графічні залежності які показані на рис. 2 і 5.



**Рисунок 3.** Схеми нерядних зубчастих диференціальних передач:  
а – ведуче сонячне зубчасте колесо; б – ведуче водило

**Figure 3.** Schemes of differential transmission:  
а – driving element is the sun gear; б – driving element is the carrier

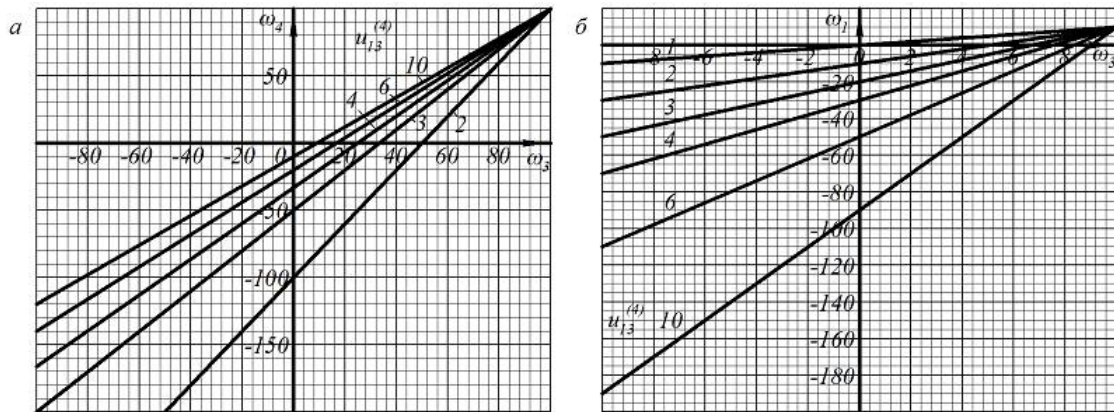
На рис. 4 показані нерядні диференціальні передачі, в яких сателіт 2 виконаний із двох паралельних зубчастих коліс з числом зубів  $z_2$  і  $z_2'$ . При цьому сонячне зубчасте колесо 1 ( $z_1$ ) з сателітом 2 ( $z_2$ ) і сателіт 2 ( $z_2'$ ) з епіциклом 3 ( $z_3$ ) можуть утворювати зовнішні (рис. 4 а, б) або внутрішні (рис. 4 в, г) зачеплення. Тоді передаточне відношення  $u_{13}^{(4)} = \frac{z_2 z_3}{z_1 z_2'}$ .



**Рисунок 4.** Схеми нерядних зубчастих диференціальних передач:  
а, в – ведуче сонячне зубчасте колесо; б, г – ведуче водило

**Figure 4.** Schemes of differential transmission:  
а, в – driving element is the sun gear; б, г – driving element is the carrier

Для аналізу зміни швидкості нерядних диференціальних механізмів, показаних на рис. 6 а, в, необхідно використати аналітичний вираз (1), а запрограмувавши його, ми отримуємо графічні залежності  $\omega_4 = f(\omega_3, \omega_1, u_{13}^{(4)})$  для умов, описаних вище. Такі графічні залежності показані на рис. 5 а.



**Рисунок 5.** Залежності  $\omega_4 = f(\omega_3, \omega_1, u_{13}^{(4)})$ , при  $u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$  і:

а –  $\omega_1 = 100 \text{ рад/с}$  для схем на рис. 4 а, в; б –  $\omega_1 = 10 \text{ рад/с}$  для схеми на рис. 4 б, з

**Figure 5.** Graphical dependences  $\omega_4 = f(\omega_3, \omega_1, u_{13}^{(4)})$ , where  $u_{13}^{(4)} = 1 \dots 10$  and:

а –  $\omega_1 = 100 \text{ rad/s}$  for the scheme on fig. 4 а, в; б –  $\omega_1 = 10 \text{ rad/s}$  for the scheme on fig. 4 б, з

Для аналізу зміни швидкості нерядних диференціальних механізмів, показаних на рис. 4 б, з, необхідно використати вираз (1) і розв'язати його відносно  $\omega_1$ .

$$\omega_1 = \omega_4(1 - u_{13}^{(4)}) + \omega_3 u_{13}^{(4)}. \quad (4)$$

Запрограмувавши вираз (4), за допомогою комп'ютерного моделювання отримано графічні залежності  $\omega_1 = f(\omega_3, \omega_4, u_{13}^{(4)})$  для умов, описаних вище. Графічні залежності  $\omega_1 = f(\omega_3, \omega_4, u_{13}^{(4)})$  показані на рис. 5 б.

**Висновки.** Отримані графічні залежності швидкості між ведучою і веденою ланками (сонячним зубчастим колесом і водилом, або навпаки) у диференціальних передачах із замкнутою гідросистемою за допомогою засобів комп'ютерного моделювання подані на рис. 2, 5, наочно підтверджують можливість керування змінами швидкості між ведучою і веденою ланками при зміні швидкості епіцикла.

Запропонована методика теоретично-комп'ютерного дослідження залежності між швидкостями в диференціальній передачі з замкнутою гідросистемою між ведучою (сонячне зубчасте колесо) і веденою (водило) ланками або навпаки, коли керування виконується через епіцикл. може бути застосована для інших схем диференціальних передач.

Отримані графічні залежності швидкості між ланками в диференціальній передачі можна використовувати при проектуванні нових пристроїв для керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач із замкнутою гідросистемою.

**Conclusions.** The obtained graphic dependences between velocities of driving and driven elements (solar gear and carrier, or vice versa) in the differential gears with a closed hydrosystem by means of computer modeling, shown in Fig. 2, 5, clearly confirming possibility of speed changes management between the driving and driven elements by changing the speed of epicycle.

The proposed method of theoretical and computer research of the dependences between the velocities of the driving and the driven elements in differential gear with a closed hydrosystem with epicycle, as a control element, can be applied to other schemes of differential gears.

The resulting graphic dependence between the velocities of elements in the differential transmission can be used in designing of new devices for speed changes management via differential gears with a closed hydraulic system.

**Список використаної літератури**

1. Стрілець, О. Керування змінами швидкості за допомогою зубчастої диференціальної передачі [Текст] / О. Стрілець, В. Стрілець, І. Шинкаренко // «Машинознавство». Всеукраїнський наук.-техн. і виробн. журнал. – 2007. – № 6 (120) – С. 38 – 41.

2. Стрілець, О. Комп'ютерне моделювання диференціальних передач з пристроєм для керування швидкістю [Текст] / О. Стрілець // «Машинознавство». Всеукраїнський наук.-техн. і виробн. журнал. – 2009. – № 12 (150). – С. 39 – 43.

3. Стрілець, О.Р. Способи керування змінами швидкості у техніці [Текст] / О.Р. Стрілець // Збірник тез. VIII-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси ПРТК-2015». – Київ: 18 – 19 травня 2015 року. – С. 220 – 221.

4. Стрілець, О.Р. Огляд і аналіз способів керування змінами швидкості у техніці [Текст] / О.Р. Стрілець // 12-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: тези. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. 28 – 29 травня 2015 року. – С. 152 – 153.

5. Малащенко, В.О. Класифікація способів і пристроїв керування процесом зміни швидкості у техніці [Текст] / В.О. Малащенко, О.Р. Стрілець, В.М. Стрілець // Підйомно-транспортна техніка. – Одеса: 2015. – № 1. – С. 70 – 78.

6. Малащенко, В.О. Огляд та аналіз способів і пристроїв сходиноквого керування змінами швидкості у техніці [Текст] / В.О. Малащенко, О.Р. Стрілець, В.М. Стрілець // Вісник національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне: НУВГП, 2015. – № 70. – С. 243 – 252.

7. Стрілець, О.Р. Огляд та аналіз способів і пристроїв безсходиноквого і комбінованого керування змінами швидкості у техніці [Текст] / О.Р. Стрілець // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне: НУВГП, 2015. – № 70. – С. 351 – 360.

8. Стрілець, О.Р. Обґрунтування можливості керування змінами швидкості за допомогою диференціальних передач [Текст] / О.Р. Стрілець // Вісник Інженерної академії України. – Київ: НАУ, 2015. – № 2. – С. 177 – 181.

9. Пат. 7328 Україна, МПК F16 Н 48/20. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості [Текст] / Стрілець В.М., Ріло І.П., Стрілець О.Р.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 20041109781; заявл. 29.11.2004; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6, 2005 р.

10. Пат. 11121 Україна, МПК F16 Н 1/28. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості [Текст] / Стрілець В.М., Ріло І.П., Стрілець О.Р., Поліщук В.П.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 200504847; заявл. 23.05.2005; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12, 2005 р.

11. Пат. 18514 Україна, МПК F16 Н 48/00. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості [Текст] / Стрілець В.М., Ріло І.П., Шинкаренко І.Т., Стрілець О.Р.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 200604863; заявл. 03.05.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11, 2006 р.

12. Пат. 18587 Україна, МПК F16 Н 48/00. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості [Текст] / Стрілець О.Р., Стрілець В.М., Шинкаренко І.Т.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 200605205; заявл. 12.05.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11, 2006 р.

13. Пат. 28489 Україна, МПК В 60 К 17/06. Планетарна коробка передач [Текст] / Стрілець О.Р.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 2007 09132; заявл. 09.08.07; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20, 2007 р.

14. Пат. 48608 Україна, МПК F16 Н 48/00. Зубчастий диференціал з пристроєм для керування змінами швидкості [Текст] / Стрілець О.Р., Стрілець В.М.; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – у № 200910172; заявл. 07.10.2009; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6, 2010 р.

15. Кіницький, Я.Т. Теорія механізмів і машин: підручн. [Текст] / Я.Т. Кіницький; НАН України. – К.: Наук. думка, 2002. – 660 с.

16. Левитский, Н.И. Теория механизмов и машин [Текст] / Н.И. Левитский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 576 с.

*Отримано 27.10.2015*