

УДК 621.825.5

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.168

ДИНАМІКА МЕХАНІЧНИХ ПРИВОДІВ З КУЛЬКОВИМИ ОБГІННИМИ МУФТАМИ

Малашенко В. О.¹, Кириченко І. Г.², Проценко В. О.³, Лисяк Б. Я.⁴

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

³Херсонська державна морська академія

⁴Дрогобицька машинобудівна компанія

Анотація. Запропоновано конструкцію кулькової обгінної муфти для стартера автомобілів та інших транспортних засобів. Розглянуто можливості коливних явищ. Установлено, що більша ймовірність виникнення динамічних явищ у таких системах має місце під час вкочування кульок у робочі пази веденої півмуфти. Запропоновано аналітичні залежності для визначення мінімального та максимального часу вмикання запатентованої кулькової обгінної муфти. Отримано моделі та основні параметри для подальших досліджень механічних приводів з кульковими обгінними муфтами, що працюють за принципом зачеплення.

Ключові слова: стартер, кулькова обгінна муфта, муфта вільного ходу, динаміка.

Вступ

З літературних джерел відомо, що механічні приводи з механізмами однобічної дії мають основну особливість: кінці їх валів автоматично з'єднуються після вмикання двигуна. Вони також автоматично роз'єднуються, якщо рух елементів стає протилежним чи ведена частина приводу обганяє провідну. Такий процес традиційно здійснюється завдяки застосуванню в кінематичних ланцюгах приводів машин і механізмів з обгінними муфтами, які передають енергію двигуна внаслідок тертя заклинення між поверхнями півмуфт роликів [1, 2]. Однак роликові муфти схильні до проковзування чи навіть буксування під час перевантажень, особливо взимку.

Аналіз публікацій

З метою покращення експлуатаційних характеристик механічних приводів машин останнім часом розроблено та запатентовано низку кулькових обгінних муфт, що передають обертальний момент від двигуна до робочої машини внаслідок зачеплення кульок із боковими поверхнями пазів півмуфт [3–16]. Ці технічні рішення потребують досліджень динамічних процесів, що можуть мати місце в кінематичному ланцюгу приводів з кульковими обгінними муфтами під час перехідних режимів їх роботи. Деякі результати дослідження динамічних процесів на сьогодні описані в роботах [15, 16]. Актуальним завданням є зменшення часу вмикання нових кулькових муфт вільного ходу, що можуть

застосовуватися у стартерах двигунів внутрішнього згорання різноманітних машин.

Мета та постановка завдання

Основною метою роботи є дослідження величини зміни мінімального й максимального часу вмикання та вимикання запропонованої кулькової обгінної муфти на першому етапі її роботи. Завдання: складання динамічної моделі приводу, оснащеного запропонованою муфтою, та визначення кінематичних і динамічних параметрів роботи приводу на першому етапі спрацьовування муфти.

Виклад основного матеріалу

Мету досягнуто на основі досліджень процесів функціонування однієї з розроблених кулькових обгінних муфт стартера автомобіля. Схема муфти наведена на рис. 1. Вона складається з таких елементів: 1 – півмуфта провідна з фланцем 2, на якому виконані пази 3; 4 – півмуфта ведена, що має циліндричну поверхню 5 з пазами 6; 7 – кульки; 8 – кільце натискне, що спирається на пружину 9; 10 – корпус зі стопорним кільцем 11. Півмуфта 4 має привідну шестірню 12. Півмуфта 1 з'єднується з валиком ротора електродвигуна стартера машини за допомогою криволінійних внутрішніх пазів.

Функціонування кулькової обгінної муфти можна також поділити на чотири етапи. Перший називаємо процесом вкочування кульок 7 у пази веденої півмуфти 4, другим етапом є повне зачеплення кульок із пазами

веденої півмуфти (робочий хід), третім – викочування кульок із пазів веденої півмуфти і завершальним, четвертим, етапом є холостий хід, тобто ковзання кульок уздовж торця веденої півмуфти. Досліджувалася

муфта з основними параметрами, наведеними в табл. 1. Така кулькова обгінна муфта довела бездоганне функціонування в складі серійного автомобільного стартера, параметри якого наведені в табл. 2.

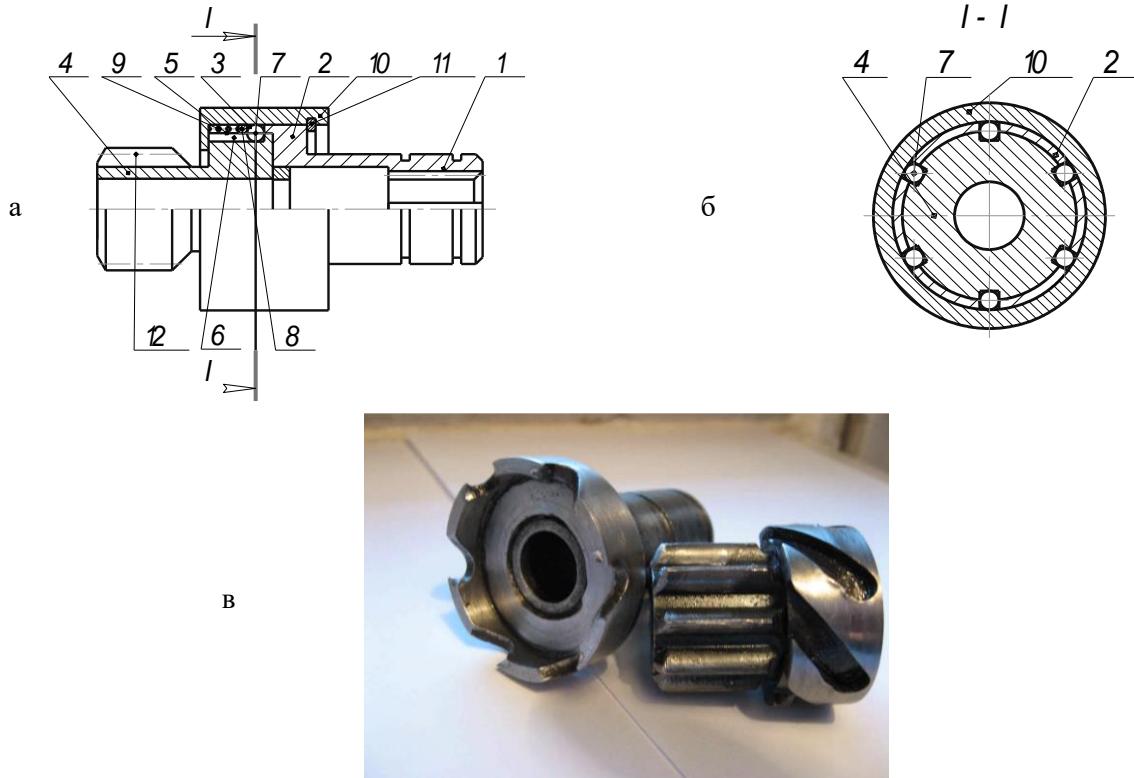


Рис. 1. Принципова конструкція кулькової обгінної муфти стартера автомобілів: *а* – загальний вигляд; *б* – переріз *I-I* загального вигляду муфти; *в* – конструкції провідної та веденої півмуфт

Таблиця 1 – Параметри розробленої кулькової обгінної муфти

Назва параметра	Одиниці виміру	Значення параметра
Ділильний діаметр привідної шестірні		26
Діаметр кола вершин зубців	мм	29
Діаметр кола западин		20
Модуль зубців		2,5
Кут зачеплення	град	15
Зовнішній діаметр веденої півмуфти чи діаметр кола центрів кульок	мм	36
Діаметр кульок		6
Кількість кульок	-	6
Довжина пазів для розміщення кульок	мм	17,8
Кут нахилу пазів до твірної зовнішнього циліндра півмуфти	град	45
Зовнішній діаметр фланця провідної півмуфти	мм	42
Зовнішній діаметр муфти (стакана)		48
Товщина фланця веденої півмуфти		16
Ширина корпусу (стакана) муфти		30
Робоча ширина корпусу		24
Товщина фланця провідної півмуфти		11,5
Глибина пазів провідної півмуфти		5

Таблиця 2 – Кінематичні та навантажувальні показники стартера СТ230-Д4

Назва та позначки параметра	Одиниці виміру	Чисельні значення
Корисна потужність стартера, P	кВт	1,50
Швидкість обертання якоря: ω_1	рад/с	417,66
n	об/хв	4000
Номінальний момент, T	Н·м	3,6
Максимальний момент, T_{\max}	Н·м	20

Важливим для таких приводів є те, що їх муфта часто функціонує в різних режимах. Її робочий і холостий стани залежать від розташування кульок у похилих пазах півмуфт. На рис. 1, а видно, коли кульки займають крайнє ліве положення, то муфта перебуває в холостому режимі та передача муфтою обертального моменту не можлива. Це пояснюється тим, що кульки розміщені в пазах тільки веденої півмуфти та проковзують по торцю провідної півмуфти. Муфта стає подібною до звичайного кулькового підшипника. Такий режим відбувається тоді, коли провідна півмуфта змінить напрям руху чи зовсім зупиниться, а ведена продовжує обертатися. Прикладом цього явища є початок роботи основного двигуна внутрішнього згорання після його запуску, коли зубчастий вінець маховика розігнався та стає провідним, а електродвигун стартера вимкнено. Тепер настає режим, коли кінематичний ланцюг привода розмикається. Дослідження показали, що на час вмикання й максимальні навантаження суттєво впливає процес вкочування кульок у пази веденої півмуфти. Особливо тоді, коли муфта переходить до робочого стану, початок якого починається з моменту досягнення кульками периферійних кінців відповідних пазів веденої півмуфти. Повний цикл функціонування механічного привода з кульковими обгінними муфтами можна поділити на чотири частини: вмикання муфти; робочий хід привода; вимкнення муфти та її холостий хід. Тривалість цих режимів у роботі різних механічних засобів не однаковий. Для транспортних систем, де має місце часте вмикання та вимкнення, більше значення мають неусталені режими роботи, а кінематичний ланцюг стає більш схильним до динамічних перевантажень, що потребує проведення ретельного аналізу коливних явищ.

Далі припускаємо таке: муфта вмикається всіма кульками одночасно; робочі деталі є жорсткими та пов'язаними між собою невагомими пружними ланками; втрати енергії на тертя кульки під час вмикання є незначними, отже, ними можна знехтувати.

Для розв'язку цієї задачі використовуємо розрахункову схему (рис. 2).

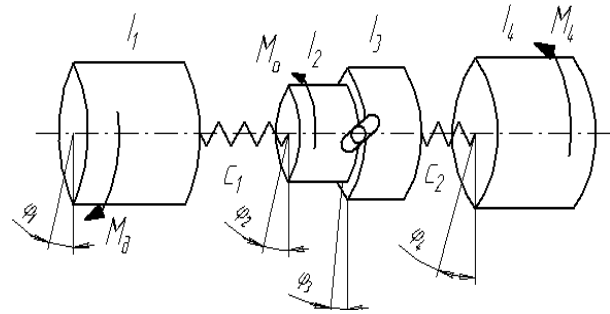


Рис. 2. Динамічна модель привода з кульковою обгінною муфтою

Специфічність розрахункової схеми (рис. 2), у якій має місце наявність початкового зазору між кульками й робочими поверхнями пазів півмуфт, що може призвести до поштовхів чи ударів, уможливорює виокремлення підсистеми. Вона містить провідну й ведену маси із зведеними моментами інерції I_1 і I_2 , що пов'язані ланкою з крутильною жорсткістю C_1 . Тоді за умови рівноваги перший етап матиме таку математичну модель:

$$\begin{cases} I_1 \varphi_1'' + C_1(\varphi_1 + \varphi_2) = M_o(t); \\ I_2 \varphi_2'' - C_1(\varphi_1 + \varphi_2) = -M_o. \end{cases} \quad (1)$$

де φ_1, φ_2 – кутові переміщення відповідних мас; $M_o(t)$ і M_o – рушійний момент і момент опору системи.

Відомо, що система (1) зводиться до одного виразу такого вигляду:

$$\varphi'' + k^2 \varphi = \frac{M_o(t)}{I_1} + \frac{M_o}{I_2}, \quad (2)$$

де $k^2 = \frac{C_1(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}$ – є сталою величиною

для веденої конструкції привода, а $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$.

З огляду на те, що на завершення першого етапу включення муфти двигун досягає номінальної швидкості, то розв'язком рівняння (2) буде таке рівняння:

$$\varphi = A \sin kt + B \cos kt + \frac{M_0 I_2 + M_0 I_1}{I_1 I_2}. \quad (3)$$

Використовуємо початкові умови $t=0$; $\varphi_1=0$; $\varphi_2=0$ та з (3) визначаємо сталі інтегрування

$$A = 0; B = -\frac{M_0 I_2 + M_0 I_1}{C_1 (I_1 + I_2)}, \quad (4)$$

та деформація пружної ланки у вигляді

$$\varphi = \frac{M_0 I_2 + M_0 I_1}{C_1 (I_1 + I_2)} (1 - \cos kt), \quad (5)$$

а максимально можливі її значення описується таким рівнянням:

$$\varphi_{\max} = \frac{2(M_0 I_2 + M_0 I_1)}{C_1 (I_1 + I_2)}. \quad (6)$$

Максимальне динамічне навантаження на першому етапі дорівнює

$$M_{\max} = \frac{2(M_0 I_2 + M_0 I_1)}{I_1 + I_2}. \quad (7)$$

Сумарне переміщення зведеної провідної маси оцінюється виразом

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{M_0}{C_1} + d + a, \quad (8)$$

де M_0/C_1 – статична деформація пружної ланки; d – діаметр кульок; a – початкове віддалення точки дотику кульки від паза веденої півмуфти, $0 \leq a \leq a_{\max}$.

Процес переміщення кульок у всіх пазах півмуфти та швидкого з'єднання півмуфт на першому етапі їх функціонування чітко наведено на рис. 3.

На цьому рисунку видно, що час вмикання муфти t є змінною величиною внаслідок різних початкових положень кульок (зміни значення відстані a), тобто має місце закономірність $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$.

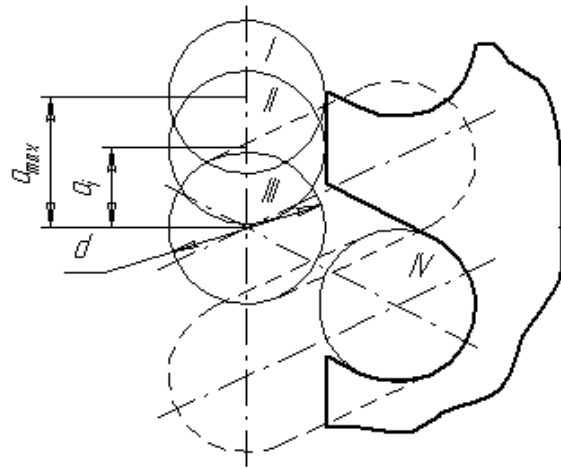


Рис. 3. Імовірні положення кульки щодо пазів веденої півмуфти: I – гірше; II – проміжне; III – краще, IV – робоче

Мінімальне значення часу вмикання кулькової обгінної муфти визначається так:

$$t_{\min} = \frac{\arccos \left[1 - \frac{(M_0 + dC_1)(I_1 + I_2)}{M_0 I_2 + M_0 I_1} \right]}{k}, \quad (9)$$

а максимальне його значення становитиме

$$t_{\max} = \frac{\arccos \left[1 - \frac{(M_0 + a_{\max} C_1 + dC_1)(I_1 + I_2)}{M_0 I_2 + M_0 I_1} \right]}{k}. \quad (10)$$

Для подальшого аналізу динамічних явищ достатньо знати максимальний обертальний момент, що прикладається з початковою швидкістю, яку матимемо після диференціювання рівняння (5)

$$\varphi' = \frac{(M_0 I_2 + M_0 I_1)k}{C_1 (I_1 + I_2)} \sin kt. \quad (11)$$

Висновки

1. Запропоновані рівняння (9) і (10) мають практичне значення, оскільки визначають величини мінімального й максимального часу вмикання механічного приводу та придатність нової кулькової обгінної муфти для кінематичних ланцюгів приводів стартерів транспортних засобів.

2. Доведено, що на час вмикання муфти суттєво впливає кількість кульок і початкове відносно їх положення щодо пазів веденої півмуфти та меншою мірою коливні явища механічної системи приводу.

3. Наведений вираз (11) для визначення початкової швидкості початку другого етапу

роботи муфти є підґрунтям для подальших досліджень приводів із кульковими обгінними муфтами.

Література

1. Малащенко В. О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2009. 208 с.
2. Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунку деталей машин. Львів: Афіша, 2003. 558 с.
3. Пат. 28884А Україна, МКИ F16D41/06. Кулькова муфта вільного ходу / В. О. Малащенко, О. І. Сороківський. Опубл. 29.12.99. Бюл. № 8.
4. Пат. 29068А Україна, МКИ F16D41/06. Конічна обгінна муфта / В. О. Малащенко, П. Я. Петренко, О. І. Сороківський. Опубл. 29.12.99. Бюл. № 8.
5. Пат. 32809А Україна, МКИ F16D41/06. Обгінна муфта / В. О. Малащенко, П. Я. Петренко, О. І. Сороківський. Опубл. 29.12.99. Бюл. № 8.
6. Пат. 45667А Україна, МКИ F16D41/06. Обгінна муфта / В. О. Малащенко, В. Т. Павлище, П. Я. Петренко, О. І. Сороківський. Опубл. 15.04.2002. Бюл. № 4.
7. Пат. 30362 Україна, МКИ F16D41/06. Обгінна муфта / В. В. Малащенко. Опубл. 2008. Бюл. № 4.
8. Пат. 53354А Україна, МКИ F16D41/06. Обгінна муфта / Г. П. Куновський, І. Є. Кравець, В. О. Малащенко, О. І. Сороківський. Опубл. 15.01.2003. Бюл. № 1.
9. Пат. 56483А Україна, МКИ F16D41/06. Обгінна муфта / Г. П. Куновський, І. Є. Кравець, В. О. Малащенко, О. І. Сороківський. Опубл. 15.01.2003. Бюл. № 5.
10. Пат. № 43260 Україна, МКИ F16D41/06. Обгінна муфта / В. О. Малащенко, П. М. Гашук, В. В. Малащенко, О. І. Сороківський. Опубл. 2009. Бюл. № 15.
11. Force parameters and operating characteristics of safety-overrunning ball-type clutch / V. Malashchenko et al. *Diagnostyka*. 2021. № 22 (3). P. 43–50.
URL: <https://doi.org/10.29354/diag/140000>
12. Safety-overrunning ball-type clutch parts contact interaction features / V. Protsenko et al. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science*. Lviv, 2022. Vol. 8, № 1. P. 38–43. URL: <https://doi.org/10.23939/>
13. Load capacity and design parameters of ball-type safety-overrunning clutch with inclined grooves sides. / V. Protsenko et al. *Diagnostyka*. 2022. № 23 (4). P. 1–8.
URL: <https://doi.org/10.29354/diag/155837>
14. Кравець І. Є. Покращення ефективності системи захисту від перевантажень та інтенсивного спрацювання приводу млинів барабанного типу. Дис. канд. техн. наук, спец. 05.02.02 – машинознавство. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2007. 143 с.
15. Malaschtchenko V., Homuschin J., Sorokivskiy O. Volnobezna qulbekova spojka. *Strojarstvo Srojirenstvi*. 2001. № 12. P. 56–58.
16. Malaschtchenko V., Sorokivskiy O. The Selection of Parameters of a Coaster Ball clutch and Recommendation for its Construction. *Transactions of the Universities of Kosicl*. 2002. № 2. P. 1–6.

References

1. Malashchenko, V. O. (2009) Mufti privodiv. Konstruktsii is the butt of rozrahunkiv. Lviv, 208 p.
2. Pavlishche, V. T. (2003) Bases that konstruyuvannya rozrahunku machine parts. Lviv, 558 p.
3. Pat. 28884A Ukraine, F16D41/06. Kulkova mufta vilnogo hodu. / V. O. Malashchenko, O. I. Sorokivsky. Publ. 29.12.99. Bulletin no. 8.
4. Pat. 29068A Ukraine, F16D41/06. Konichna obginna mufta / V. O. Malashchenko, P. V. Petrenko, O. I. Sorokivsky. Publ. 29.12.99. Bulletin no. 8.
5. Pat. 32809A Ukraine, F16D41/06. Obginna mufta / V. O. Malashchenko, P. V. Petrenko, O. I. Sorokivsky. Publ. 29.12.99. Bulletin no. 6.
6. Pat. 45667A Ukraine, F16D41/06. Obginna mufta / V. O. Malashchenko, V. T. Pavlishche, P. V. Petrenko, O. I. Sorokivsky. Publ. 15.04.2002. Bulletin no. 4.
7. Pat. № 30362 Ukraine, F16D41/06. Obginna mufta / V. V. Malashchenko. Publ. 15.02.2008. Bulletin no. 4.
8. Pat. 53354A Ukraine, F16D41/06. Obginna mufta / G. P. Kunovsky, I. Ye. Kravets, V. O. Malashchenko, O. I. Sorokivsky. Publ. 15.01.2003. Bulletin no. 1.
9. Pat. 56483A Ukraine, F16D41/06. Obginna clutch / G. P. Kunovsky, I. Ye. Kravets, V. O. Malashchenko, O. I. Sorokivsky. Publ. 15.01.2003. Bulletin no. 5.
10. Pat. № 43260 Ukraine, F16D41/06. Obginna muft / V. O. Malashchenko, P. M. Gaschuk, V. V. Malashchenko, O. I. Sorokivsky. Publ. 12.52009. Bulletin no. 15.
11. Malashchenko, V., Protsenko, V., Klysz, S., Nastasenko, V., Babiy, M. (2021) Force parameters and operating characteristics of safety-overrunning ball-type clutch. *Diagnostyka*, no. 22 (3), pp. 43–50.
URL: <https://doi.org/10.29354/diag/140000>
12. Protsenko, V., Malashchenko, V., Klysz, S., Avramenko, O. (2022) Safety-overrunning ball-type clutch parts contact interaction features. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science*. Lviv, vol. 8, no. 1, pp. 38–43. URL: <https://doi.org/10.23939/>
13. Protsenko, V., Malashchenko, V., Klysz, S., Nastasenko, V., Babiy, M., Avramenko, O. (2022) Load capacity and design parameters of ball-type safety-overrunning clutch with inclined

- grooves sides. *Diagnostyka*, no. 23 (4), pp. 1–8.
URL: <https://doi.org/10.29354/diag/155837>
14. Kravets, I. Ye. (2007) Pokraschennya efektyvnosti systemi zahistu vid perevantazhen that intensivnogo spratsyuvannya mliniv barabannogo tipu. Ph.D. Dis. Lviv, 143 p.
 15. Malashtchenko, V., Homuschin, J., Sorokivskiy, O. (2001) Volnobezna qulbekova spojka. *Strojarstvo Srojirenstvi*, no. 12, pp. 56–58.
 16. Malashtchenko, V., Sorokivskiy, O. (2002) The Selection of Parameters of a Coaster Ball clutch and Recommendation for its Construction. *Transactions of the Universities of Kosic*, no. 2, pp. 1–6.

Малашенко Володимир Олександрович¹, д-р техн. наук, професор кафедри технічної механіки та динаміки машин, volod.malash@gmail.com, тел. +38-067-860-45-04.

Кириченко Ігор Георгійович², д-р техн. наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин, igk160450@gmail.com, тел. +38-067-705-54-74.

Проценко Владислав Олександрович³, д-р техн. наук, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, 1904pvo@gmail.com, тел. +38-050-494-74-72.

Лисяк Богдан Ярославович⁴, «Дрогобицька машинобудівна компанія», директор, lysiak.br@gmail.com, тел. +38-067-801-91-16.

¹Національний університет «Львівська політехніка», 79013, Україна, м. Львів, вул. С. Бандери, 12.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61000, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

³Херсонська державна морська академія, 73000, Україна, м. Херсон, просп. Ушакова, 20.

⁴Дрогобицька машинобудівна компанія, 82100, Україна, м. Дрогобич, вул. Гайдамацька, 22.

Dynamics of mechanical drives with ball overrunning clutches

Abstract. Problem. The possibilities of application and the principle of operation when turning on the new overrunning ball clutch are considered. Its design for the standard starter of cars and other vehicles must function during operation in various modes. The main goal of the work is to study the amount of change in the minimum and maximum time of turning on and off the proposed ball overrunning

clutch, taking into account dynamic phenomena at the first stage of its operation. **Methodology.** The kinematic chain of the drive is considered as the functioning of an elastic system. It has been established that there is a higher probability of dynamic phenomena occurring in such systems during the rolling of the balls into the working grooves of the driven semi-coupling, so this process is considered in the paper. **Results.** The results of these studies improve the characteristics of unstable modes of operation of new clutches, which can be introduced into production after comprehensive studies of their loading capacity. When the clutch switches to another mode of operation, the oscillating phenomena of its elements are not completely excluded. **Originality.** Therefore, in order to improve the smoothness of the operation of such new clutches, the possibility of taking into account oscillatory phenomena is being considered. **Practical value.** Developed analytical dependencies for determining the minimum and maximum engagement time of the ball overrunning clutch are presented. The main parameters for further research of mechanical drives with overrunning ball clutches, for which the operating torque is known, have been obtained.

Key words: clutch, overrunning ball clutch, free-wheel clutch, drive kinematics.

Malashchenko Volodymyr², Doct. of Science, Prof., Technical Mechanics and Machine Dynamics Department, volod.malash@gmail.com, tel. +38-067-860-45-04.

Kyrychenko Ihor², PhD, Doct. of Science, Prof., Department of Construction and Road-Building Machinery, olegcherbak@gmail.com, tel. +38-097-233-30-83.

Protsenko Vladyslav³, Doct. of Science, Prof., Transport Technologies and Mechanical Engineering Department, 1904pvo@gmail.com, tel. +38-050-494-74-72.

Lysiak Bohdan⁴, engineer, director, lysiak.br@gmail.com, tel. +38-067-801-91-16.

¹Kherson State Maritime Academy, 20, Ushakova ave., Kherson, 73000, Ukraine.

²Lviv Polytechnic National University, 32, St. Bandera str., Lviv, 79013, Ukraine.

³Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

⁴Drogobych Machine-Building Company, 22, Haydamatska str., Drogobych, 82100, Ukraine.