

УДК 621.825 (075.8)

DOI: 10.15276/pidtt.1.69.2025.02

¹Малащенко В. О., ²Семенюк В. Ф., ³Борис А. О. ⁴Лисяк Б. Р.

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Національний університет «Одеська політехніка»

³Брюховецька компанія легкої промисловості

⁴Дрогобицька машинобудівельна компанія

ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ ПРИВОДІВ З КУЛЬКОВИМИ ОБГІННИМИ МУФТАМИ

Анотація. У статті наведено конструкційні та силові особливості кулькової обгінно-запобіжної муфти, що може ефективно застосовуватися в кінематично-силових, що передають навантаження тільки в одному напрямку і запобігають перевантажень робочих органів машин. Відомо, що роликові обгінні муфти передають навантаження за рахунок тертя заклинених роликів між поверхнями півмуфт і під час значних перевантажень можуть проковзувати, що приводить до їх спрацьовування. Кулькові обгінні муфти передають робочі навантаження зачепленням кульок з робочими поверхнями півмуфт і тому значні перевантаження може викликати місцеві деформації робочих поверхонь півмуфт чи кульок. Одним із розв'язків такої проблеми може бути застосування кулькових обгінно-запобіжних муфт, які спроможні автоматично роз'єднувати кінематичний ланцюг під час перевантажень. Проведені дослідження запропонованої муфти переконливо підтвердили те, що розроблені кулькові обгінно-запобіжні муфти можна ефективно застосовувати як пристрої для обмежування величини обертового моменту в механічних приводах машинобудування.

Ключові слова: муфти, обгінні муфти, кулькові запобіжні муфти, з'єднання приводів.

Вступ. Відомо, що механічні приводи широко застосовуються в різних областях машинознавства для передавання сталих та змінних за величиною і напрямком робочих навантажень. З'єднувально-роз'єднувальним механізмів з муфтам вільного ходу постійно приділяється велика увага науково-інженерного персоналу. Основними об'єктами досліджень таких муфт є розробка нових ефективніших їх конструкцій, що покращують процес передавання навантаження тільки в одному напрямку. Роликовим обгінним муфтам присвячено багато наукових праць, які достатньо відомі, тому наводити їх в даній статті немає потреби.

Постановка задачі. Відомо, що механічні приводи з різноманітними муфтами широко застосовуються в технічних засобах різних галузей машинобудування, біту та особливо в підйомно-транспортних машинах і механізмах. Для покращення процесів функціонування приводів необхідна надійна робота всіх їхніх частин. Особливе значення це має для приводів, що включають кулькові обгінні муфти та можуть перевантажуватись під час експлуатації. Ця обставина ставить необхідну задачу таку, що для механічних приводів з передаванням навантаження тільки в одному напрямку необхідно передбачити можливість автоматичного роз'єднання ланок кінематичного ланцюга при перевантаженнях. При чому необхідні зусилля можуть регулюватися відповідним затягуванням робочої пружини. Таки обставини вимагають проведення досліджень процесів передавання навантажень та створення нових приводів із кульковими обгінно-запобіжними муфтами і проведення необхідних їхніх розрахунків. Тому в даному випадку основною задачею цієї статті є наведення та опис нової запатентованої конструкції кулькової обгінно-запобіжної муфти і результати її досліджень.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Пізніше розроблено та запатентовано ряд кулькових обгінних муфт таких як [1...7,11 та інші]. На тепер відомо роботи з розробки конструкцій, принципу роботи та навантажувальної спроможності згаданих і розроблених кулькових обгінних муфт та дослідження величини їх навантажень [8...10]. Відомі також дослідження терміну експлуатації та надійності цього типу муфт, а також зниження точності виготовлення і металомісткості [12...15]. Окремі дослідження нової кулькової обгінно-запобіжної муфти проведено в роботі [16], де розглянуто важливе питання, що пов'язане з ефективністю застосування нової кулькової обгінно-запобіжної муфти в механічних приводів різнотипних машин та механізмів з метою розширення функціональних їх можливостей стосовно обмеження максимального обертового моменту під час перевантажень. Принципова схема однієї із розроблених кулькових обгінно-запобіжних муфт наведена на рис.1, що є об'єктом подальших досліджень даної статті.

Мета досліджень – розробка методу захисту від перевантажень кінематичних ланцюгів механічних приводів з кульковими обгінними муфтами застосуванням обмежувачів величини робочого навантаження.

Виклад основного змісту дослідження. Запропонована кулькова обгінна муфта складається із двох основних частин (рис. 1), кожна із яких в робочому стані виконує певну функцію. Тобто ліва частина муфти виконує обгінну функцію, а права – запобіжну.

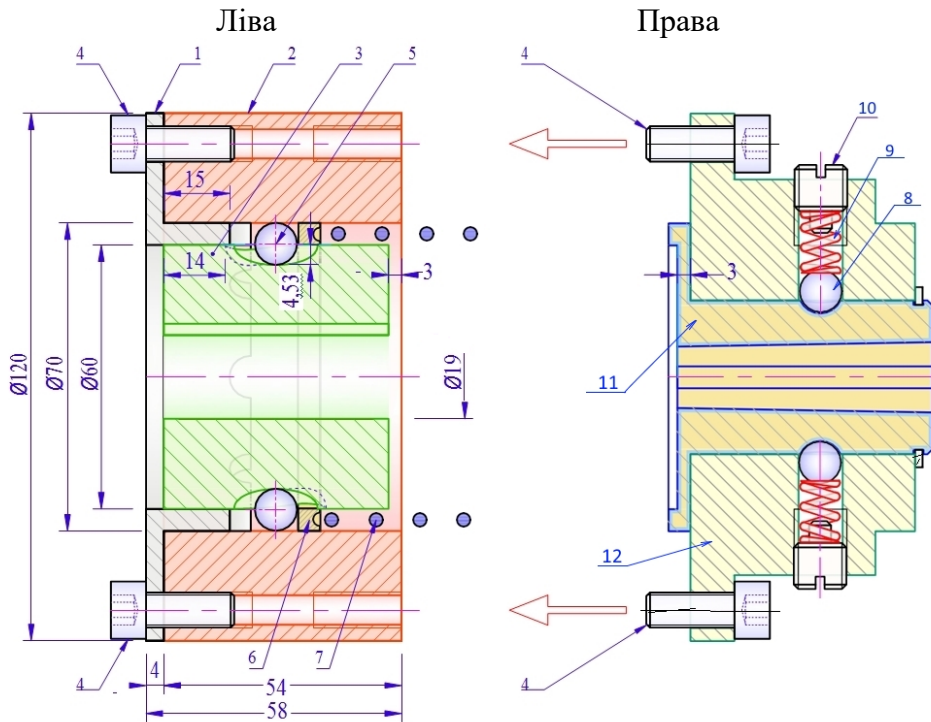


Рисунок 1 - Дві основні частини кулькової обгінно-запобіжної муфти

Після з'єднання цих частин отримуємо обгінно-запобіжну муфту (рис. 2).

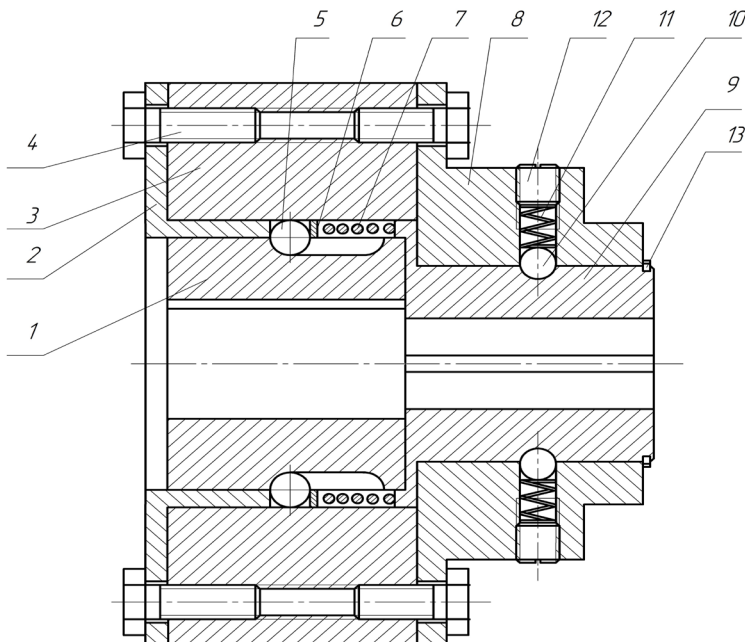


Рисунок 2 – Загальний вигляд кулькової обгінно-запобіжної муфти в робочому стані

На рис. 2 наведено кулькову обгінно-запобіжну муфту, що підготовлена повністю до експлуатації. Конструкція її включає: 1 – ведуча напівмуфта обгінної частини муфти; 2 – ведена напівмуфта обгінної частини; 3 – корпус обгінної частини муфти; 4 – з'єднувальні гвинти; 5 – кульки; 6 – натискне кільце; 7 – пружина обгінної частини муфти; 8 – регулюючі гвинти запобіжної частини муфти; 9 – пружини запобіжної частини муфти; 10 – зовнішня півмуфта запобіжної частини пристрою; 11 – кульки обгінної частини муфти; 12 – пружини для регулювання величини обертального моменту; 13 – гвинти для регулювання величини обертального моменту; 13 – стопорне розрізне кільце.

Для повнішого розуміння про конструкцію кулькової обгінно-запобіжної муфти (рис. 2) нижче наведено загальні вигляди основних її елементів (рис. 3) з описом деталей.



Рисунок 3 - Загальний вигляд основних деталей дослідної моделі муфти:

1 – ведуча півмуфта обгінної частини муфти; 2 – ведена півмуфта обгінної частини; 3 – корпус обгінної частини муфти; 4 – натискне кільце; 5 – пружина обгінної частини муфти;

6 – регулюючі гвинти запобіжної частини муфти; 7 – пружини запобіжної частини муфти;

8 – стопорне кільце; 9 – зовнішня півмуфта запобіжної частини; 10 – внутрішня півмуфта запобіжної частини пристрою; 11 – кульки;

У зібраному стані запатентована муфта є компактною, що підтверджується наведеним рисунком 4.

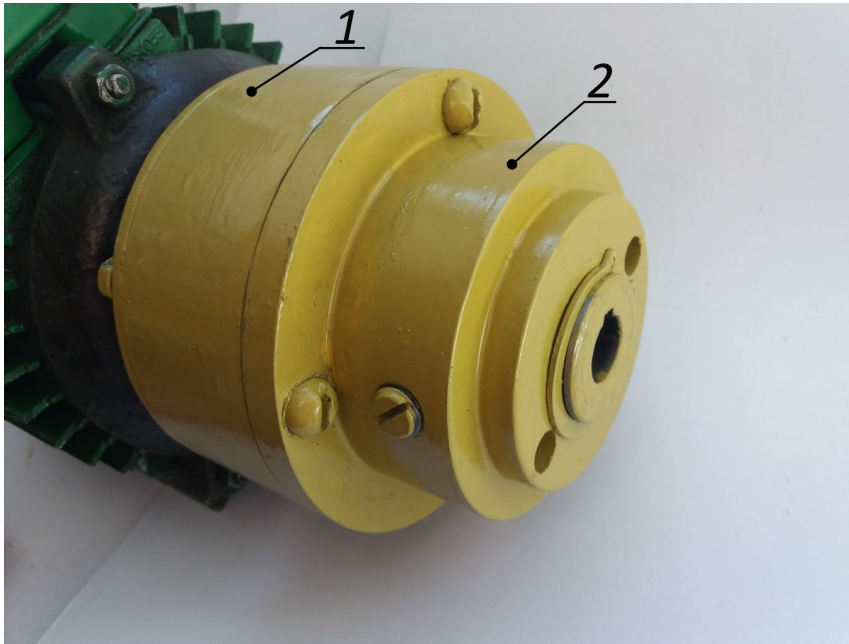


Рисунок 4 - Загальний вигляд дослідної моделі кулькової обгінно-запобіжної муфти: 1 – обгінна частина муфти; 2 – запобіжна частина муфти

Слід наголосити, що з появою нової кулькової обгінно-запобіжної муфти є потреба у розв'язуванні важливої для практики задачі з аналізу геометрично-силових закономірностей таких пристроїв. Вони розширюють можливості контролю роботоздатності механічного привода під час перевантаження тим, що запобігають дії перевантажень та руйнуванню основних елементів кінематичного ланцюга.. На сам перед важливо теоретично установити умову точного спрацювання запобіжної частини розробленої муфти, та запропонувати математичну модель цієї умови з урахуванням основних геометричних і силових чинників, що виникають під час перевантаження. Розв'язок цієї задачі розширює функціональні можливості обгінної муфти. Більше того запобіжна частина муфти істотно підвищує надійність роботи не тільки муфти, але й усіх складових частин механічного привода, які розміщуються після муфти. Це відбувається тому, що кінематичний ланцюг миттєво роз'єднуються під час перевантаження та робочий орган миттєво зупиняється. Рахуємо, що не суттєвими недоліками розробленої муфти є виникнення стукоту під час роз'єднання валів, але така обставина навіть може слугувати сигналом оператору для зупинки двигуна. Умову роз'єднання ведучої та веденої частини муфти зручно розпочати з розгляду силової взаємодії, при якій кулька виходить з лунки півмуфти. Із розробленої схеми рис. 5 видно, що кулька вийде з лунки тоді, коли реакція $R_1 = 0$. Така умова можлива тоді, коли осьова складова колової сили F_{t2} переборє силу пружності пружини F_n .

Більше того до осьової складової сили для точних розрахунків необхідно додати відцентрову силу, яку розвивають кульки, що обертаються з кутовою швидкістю рівною швидкості механічного привода. Визначення колової сили F_{t2} виконується із класичної умови рівноваги на початку руху привода наступного вигляду:

$$F_{t1}d_1z_1 - F_{t2}d_2z_2 = 0, \quad (1)$$

де F_{t1} і F_{t2} – відповідно колові зусилля, що діють на одну кульку обгінної і запобіжної частин муфти; d_1 і d_2 – діаметри кіл центрів цих кульок; z_1 і z_2 – кількість кульок обгінної та запобіжної частин муфти.

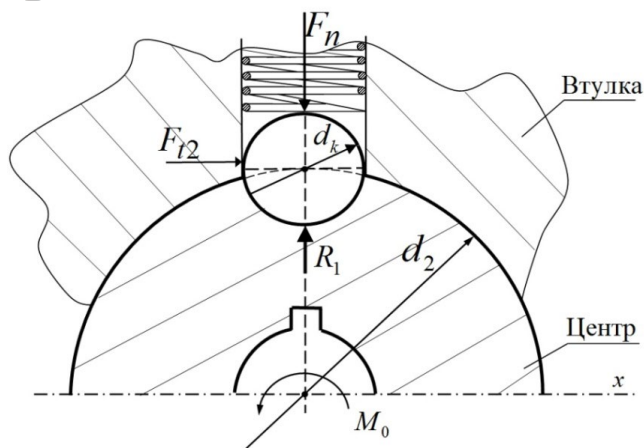


Рисунок 5 - Розрахункова схема запобіжної частини обгінно-запобіжної муфти при передаванні обертального моменту

Рівняння (1) перепишемо в наступному вигляді

$$F_{t2} = \frac{F_{t1}d_1z_1}{d_2z_2}. \quad (2)$$

Для відомих залежностей ведучої ланки муфти можна записати:

$$F_{t1} = \frac{2T_1}{d_1}, \quad \text{а} \quad T_1 = \frac{P_1}{\omega_1} \quad (3)$$

Та використовуючи (3) матимемо

$$F_{t2} = \frac{2Pd_1z_1}{\omega_1d_1d_2z_2} = \frac{2Pz_1}{\omega_1d_2z_2} \quad (4)$$

Для міцнісних характеристик нової муфти необхідно визначити всі внутрішні сили, що виникають у місцях контакту окремих її части під час передавання приводом обертальних моментів з урахуванням інерційних сил, що виникають від обертання кульок відносно осі муфти.

Розглянуто процес запобіжності муфтою перевантажень системи приводу для того, щоб встановити умову автоматичного роз'єднання кінематичного ланцюга у разі зростання обертового моменту до небажаної величини. Для цього використовуємо відомий принцип суперпозиції і розглядаємо окремо кожен елемент муфти у миттєвій рівновазі.

Для веденої напівмуфти запобіжної частини муфти розроблена розрахункова схема наведена на рис.6, де зображено миттєве довільне положення цієї частини з силами дії кульки на робочу поверхню заглиблення.

Для цього прийнято такі позначення: R_1 – рушійна сила тиску кульки; R_2 – сила тиску кульки від регулюючої пружини; $M_0 = T_{max}$ – момент опору (момент перевантаження); α_1 – кутова координата точки A; α_2 – кут нахилу сили R_1 ; φ – кутова координата проміжного положення кульки.

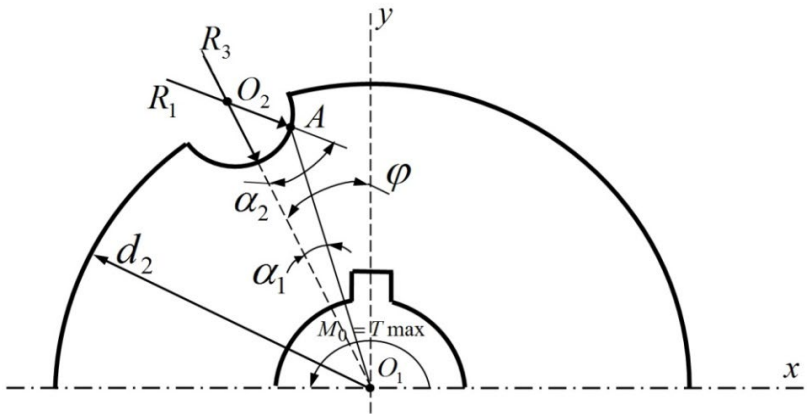


Рисунок 6 - Розрахункова схема веденої частини півмуфти

Встановлено, що для покращення точності спрацьовування муфти під час перевантаження необхідно врахувати не тільки рушійну силу, але і силу інерції кульки тому, що маса її здійснює деякий обертовий рух. Це особливо проявляється під час неусталених режимів навантаження кінематичного ланцюга. Це дозволяє уточнення величини загального моменту сили, з яким кулька діє на робочу поверхню заглиблення. Він визначається визначаємо так

$$M_k = I_1 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + R_1 \frac{d_2}{2} \sin \alpha_2, \quad (5)$$

де I_1 – момент інерції з'єднувальної кульки.

Кут нахилу реакції R_1 із рис. 6 визначаємо за теоремою косинусів

$$\cos \alpha_2 = \frac{O_2 A^2 + O_2 O_1^2 - A O_1^2}{2 O_1 O_2 \cdot O_1 A}. \quad (6)$$

Для визначення реактивного моменту на втулці зручно розглянути у миттєвій рівновазі втулку з внутрішнім радіусом $d_2/2$ та моментом інерції I_2 відносно осі обертання O_1 . Відомо, що з боку кульки на втулку діє сила F_{t2} , яка викликає реакцію $N_2 = F_{t2}$. Лінія дії цієї реакції має завжди проходити через центр кульки O_2 . Окрім того, внаслідок наявності нарізowego з'єднання втулки з регульованим гвинтом та пружиною, на втулку діє сила пружності пружини F_n , що для даного випадку визначається за залежністю (7)

$$F_n = c(y_0 + r + r_0), \quad (7)$$

де c – жорсткість пружини; y_0 – величина осьової деформації пружини при не рухомій муфті; r_0 – полярний радіус центра кульки при не рухомій муфті

($r_0 = O_1O_2$); r – полярний радіус кульки під час руху муфти.

Тепер можна визначити сумарний реактивний момент T_B на втулці за таким диференціальним рівнянням обертового руху втулки

$$T_B = I_B \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - N_2 \frac{d_2}{2} \sin \alpha_3, \quad (8)$$

де I_B – момент інерції втулки, а кут α_3 легко визначається із $\Delta O_1 O_2 B$ за теоремою косинусів

$$\cos \alpha_3 = \frac{BO_2^2 + O_2O_1^2 - BO_1^2}{2O_1O_2 \cdot O_1B}. \quad (9)$$

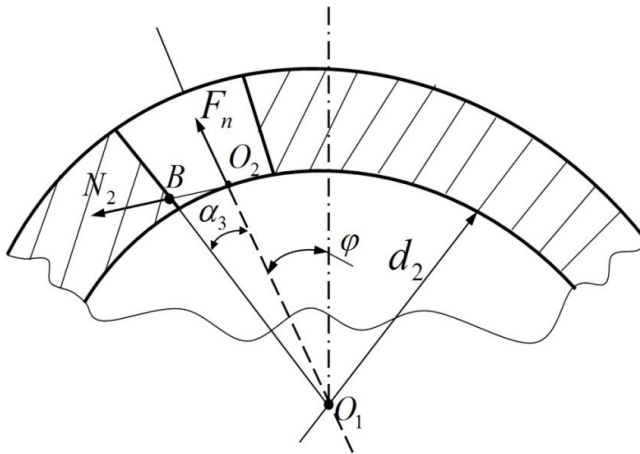


Рисунок 7 - Розрахункова схема силової взаємодії втулки

Тепер розглянемо закономірності руху кульки. Для цього використовується розрахункова схема, що наведена на рис. 8 та враховуються всі силові чинники, що діють на кульку під час основного робочого режиму. За основу приймаємо положення кульки подібне до попередніх рисунків.

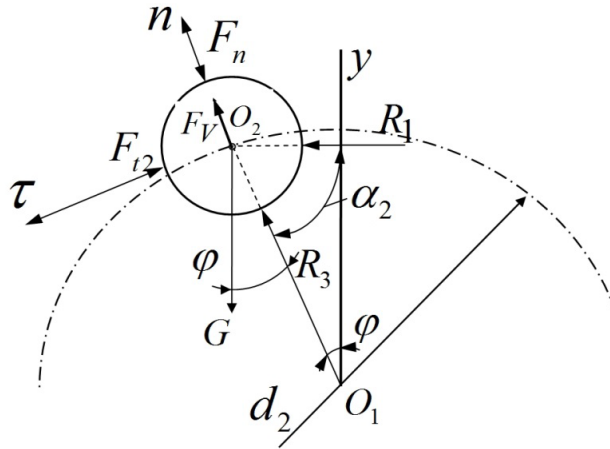


Рисунок 8 - Розрахункова схема силової взаємодії під час руху кульки

Із рис. 8 видно, що у довільному положенні на кульку діють наступні сили: R_1 і R_2 – реакції робочих поверхонь центральної веденої півмуфти; $G = mg$ – сила ваги кульки; m – її маса; F_n – сила пружності регульованої пружини; F_v – відцентрова сила самої кульки; F_{t2} – рушійна сила привода.

У даному випадку для спрощення розв'язку задачі вигідно з центром кульки (точка O_2) зв'язати рухому систему координат $\tau O_2 n$. Це пояснюється тим, що тоді диференціальні рівняння руху кульки в проекціях на осі рухомої системи координат матимуть вигляд:

– на вісь n :

$$m \left(\frac{r d^2 \varphi}{dr^2} \frac{d^2 r}{dt^2} - \frac{d\varphi}{dt} r \right) - R_1 \cos \alpha_2 + mg \cos \varphi + c (y_0 + r - r_0) - R_3 = 0, \quad (10)$$

на вісь τ :

$$m \left(\frac{d^2 \varphi}{dr^2} r + 2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \frac{dr}{dt} \right) - R_1 \sin \alpha_2 - mg \sin \varphi = F_{t2}, \quad (11)$$

де $\frac{d\varphi}{dt}$ – колова швидкість муфти на початку спрацювання; $\frac{d^2 \varphi}{dt^2} r$ – нормальне прискорення; $2 \frac{d\varphi}{dt} \frac{dr}{dt}$ – прискорення кориоліса; $r = \frac{d_2}{2}$ –

віддаля між центром кульки (O_2) та віссю обертання муфти (O_1), а зусилля R_1 і F_{t2} дорівнюють:

$$R_1 = \frac{1}{r \sin \alpha_2} \left(T_p - I_1 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \right), \quad F_{t2} = \frac{I_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2}}{r}, \quad (12)$$

де T_p – розрахунковий обертальний момент, при якому відбувається роз'єднання кінців валів; I_1 і I_2 – момент інерції відповідно центральної частини муфти і втулки.

Отримані значення R_1 і F_{t2} (12) підставимо у рівняння (11), матимемо

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} + \left(\frac{I_1 \operatorname{ctg} \alpha_2 + I_2}{r} \right) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - m \frac{d^2 \varphi}{dt^2} r - \frac{T_p}{r} \operatorname{ctg} \alpha_2 + mg \cos \varphi + c(y_0 + r - r_0) = 0$$

;

$$(mr^2 + I_1 + I_2) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - mgr \sin \varphi + 2rm \frac{d\varphi}{dt} \frac{dr}{dt} = -T_p. \quad (13)$$

Із другого рівняння системи визначаємо значення прискорення кульки $\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ і підставляємо його у перше рівняння, яке набуває такого вигляду

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 r}{dt^2} mr \varphi^2 + \frac{T_p}{r} \operatorname{ctg} \alpha_2 - mg \cos \varphi - c(y_0 + r - r_0) - \\ & - \frac{I_1 \operatorname{ctg} \alpha_2 + I_2}{mr^2 + I_1 + I_2} \left(mgr \sin \varphi + \frac{T_p}{r} - 2\varphi m \frac{dr}{dt} \right) + R_3. \end{aligned} \quad (14)$$

Із аналізу останнього рівняння видно, що кулька почне рухатись у радіальному напрямку при умові, коли реакція R_3 стане від'ємною. Такий стан є можливим тоді, коли $r = r_0$ і $\frac{dr}{dt} = 0$. Для таких умов має виконуватися нерівність (15), яка і є умовою спрацьовування запобіжної частини муфти, що приводить до запобігання перевантажень робочих частин механічних приводів, а саме:

$$mr_0 \omega^2 + \frac{T_p (mr_0 + I_2) \operatorname{ctg} \alpha_2}{r_0 mr_0^2 + I_1 + I_2} - cy_0 - mg(\cos \varphi + \frac{I_1 \operatorname{ctg} \alpha_2 + S_2}{mr_0^2 + I_1 + I_2} \sin \varphi) \leq 0. \quad (15)$$

Висновки

1. Наведено конструктивні особливості запатентованої муфти та принцип запобігання перевантажень елементів механічних приводів машин та механізмів таких, що призначені передавати обертальний момент тільки у одному напрямку та автоматичному запобіганні перевантажень їх елементів.

2. Запропонована умова спрацьовування запобіжної частини муфти, що має не тільки наукову новизну, але і практичне значення. Вона дає можливість визначити чинники муфти у широкому діапазоні

та уможливило для відомого (наперед заданого) перевантаження вибрати необхідні геометричні та жорсткісні параметри запобіжної частини кулькової обгінно-запобіжної муфти для надійного розмикання кінців валів кінематичного ланцюга механічного привода та продовження їх роботоzдатності.

3. Отримані результати запропоновано використовувати в різноманітних підйомно-транспортних засобах в широкому діапазоні навантажень тому, що величина передавального обертового моменту легко регулюється жорсткістю пружин запобіжної частини муфти.

Список використаних джерел

1. А.С. № 1423838, БИ № 34, 1988. Обгонная муфта. Малащенко В.А., Калинин С.Г., Петренко П.Я.
2. А.С. № 1423839, БИ № 34, 1988. Обгонная муфта. Малащенко В.А., Калинин С.Г., Петренко П.Я.
3. А.С. № 1691623, БИ № 42, 1991. Обгонная муфта. Малащенко В.А., Калинин С.Г., Петренко П.Я.
4. А.С. № 1691624, БИ № 42, 1991. Обгонная муфта. Малащенко В.А., Калинин С.Г., Петренко П.Я.
5. А.С. № 1698520, БИ № 42, 1991. Обгонная муфта. Малащенко В.А., Рябов В.Г.
6. Патент на корисну модель. №154144 *F16D 41/16*(2006/01) Обгінно-запобіжна муфта Малащенко В.О., Сологуб Б.В., Лисяк Б.Р. 11.10.2023, бюль. № 41.
7. Борис А.О. Патент України № 126111. "Обгінно-запобіжна муфта". Держ. реєстр від 11.06.2018.
8. Борис А.О. Конструкція та принцип роботи кулькової обгінної муфти транспортного засобу// Підйомно-транспортна техніка. – Одеса. 2017. – С. 81-85.
9. A. Borys, V. Malaschchenko, V. Yankiv. «Влияние динамических явлений на нагрузку элементов приводов с шариковой обгонной муфтой» MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture Lublin-Rzeszow-2016., – С. 2-7.
10. Борис А.О., Малащенко В.О., Федик В.В., «Force interaction in the elements of clutch with parallel grooves in driven half sleeve.», Вісник НУ "Львівська політехніка" Динаміка, міцність та проектування машин і приладів, 2015. – С. 106 – 110.
11. Малащенко В.О., Борис А.О. Патент України № 126111. "Обгінно-запобіжна муфта". Держ. реєстр від 11.06.2018.
12. Malaschchenko V.O., Borys A.O. Force turning of the torque limiter // XX международная конференция, "Развитие науки в XXI веке" Харків 2016 . – С. 64-70.

13. Малащенко В.В. Підвищення ефективності механізмів вільного ходу застосуванням кулькових муфт. Дис. канд. техн. наук - 05.02.02, – Львів, НУ "Львівська політехніка", 2009. – 131с.
14. Malaschchenko V, Homuschin J, Sorokivskij O. Vol'nobezna qulbekova spojka. Strojarstvo Srojirenstvi, № 12, 2001. – С.56 - 58 (Slovinsko).
15. Malaschchenko V, Sorokivskij O. The Selection of Parameters of a Coaster Ball clutch and Recommendation for its Construction. Transactions of the Universities of Kosic, № 2, 2002. – С. 1–6 (Slovinsko).
16. Малащенко В.О., Семенюк В.Ф., Борис А.О, Матвіїв Б.Т. Ефективність застосування кулькової обгінно–запобіжної муфти механічних приводів. Науково – технічний журнал "Підйомно–транспортна техніка". – Одеса, 2018, – С. 104–112.

IMPROVED PERFORMANCE OF DRIVES WITH BALL OVERRUNNING CLUTCHES

¹Malashchenko V. O., ²Semenyuk V. F., ³Boris A. O., ⁴Lysiak B. R.

¹Lviv Polytechnic National University

²Odesa Polytechnic National University

³Bryukhovetska light industry company

⁴Drohobytsk machine-building company

Abstract. *The article describes the structural and power features of the ball overrunning safety clutch, which can be effectively used in kinematic-power systems that transmit loads in only one direction and prevent overloading of the working bodies of machines. It is known that roller overrunning clutches transfer the load due to the friction of the jammed rollers between the surfaces of the half-couplings and during significant overloads they can slip, which leads to their activation. Overrunning ball couplings transmit working loads by engaging the balls with the working surfaces of the half-couplings, and therefore significant overloads can cause local deformations of the working surfaces of the half-couplings or balls. One of the solutions to such a problem can be the use of ball overrunning safety clutches, which are capable of automatically disconnecting the kinematic chain during overloads. The conducted studies of the proposed clutch convincingly confirmed that the developed ball overrunning safety clutches can be effectively used as devices for limiting the magnitude of the rotational moment in mechanical drives of machine build.*

Key words: *couplings, bypass couplings, safety ball couplings, connection of drives.*