УДК 621.825.5/.7

В.О. ПРОЦЕНКО, О.Ю. КЛЕМЕНТЬЄВА
Херсонська державна морська академія

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАПОБІЖНИХ КАНАТНИХ МУФТ ДЛЯ ЗАХИСТУ МАШИН ВІД ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

В статті запропоновано конструкцію та описано процес спрацьовування запобіжної муфти з канатними елементами. Встановлені умови можливості виконання муфтою запобіжних функцій залежно від того, яка з напівмуфт є ведучою. Отримані залежності для визначення часу удару суміжних втулок ведучої та веденої напівмуфт та часу екстракції пальця. Отримано також вираз для визначення граничної кутової швидкості, за якої муфта з відомими конструктивними параметрами здатна виконувати запобіжні функції. Отримані результати дозволяють оцінити геометричні та кінематичні можливості роботи муфти з канатами тангенціального розташування як запобіжної, та можуть стать основою методики проектування нових муфт.

Ключові слова: муфта, канат, швидкодія, перевантаження, експлуатація.

V.O. PROTSENKO, O.YU. KLEMENTYEVA
Kherson State Maritime Academy

JUSTIFICATION PARAMETRES OF SAFETY ROPE CLUTCHES FOR GUARD MACHINES FROM OPERATION OVERLOADS

It is offered the construction and described operation process of a safety clutch with rope elements in the article. Conditions of possibility execution by a clutch safety functions depending on what of semiclutches is the leader are fixed. Dependences for definition of time blow adjacent sleeves of leading and led semiclutches and extraction time of finger are received. Expression for definition of a limiting angular velocity is received also at which clutch with known design data is capable to execute safety functions. The received results allow to evaluate geometrical and kinematic possibilities of operation clutch with ropes of a tangential arrangement as safety, and can become the fundamentals of a technique projection new clutches.

Keywords: clutch, rope, speed, overload, maintenance.

Вступ. Від ефективності роботи та швидкодії запобіжних пристроїв машин напряму залежить їх довговічність. В той же час, ускладнення конструкції цих пристроїв призводить до підвищення вартості машин та зниження їх конкурентоспроможності на ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У випадку одиничних або епізодичних перевантажень приводи машин обладнують запобіжними пристроями якнайпростішої конструкції. Але для зниження динамічних навантажень та компенсації неспіввісності їх нерідко комбінують з пружними муфти, які в цьому випадку передають комбінованій конструкції свої недоліки, до яких належить низька ремонтопридатність та висока складність конструкції [1–3].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. З огляду на вищевикладене, створення та обґрунтування параметрів простих за конструкцією та ефективних запобіжних пристроїв є актуальною задачею для сучасного машинознавства та галузевого машинобудування.

Формулювання мети роботи. Авторами розроблена та запатентована муфта з канатними пружними елементами, що здатна реалізувати запобіжні функції. Устрій цієї муфти зрозумілий з рис. 1.

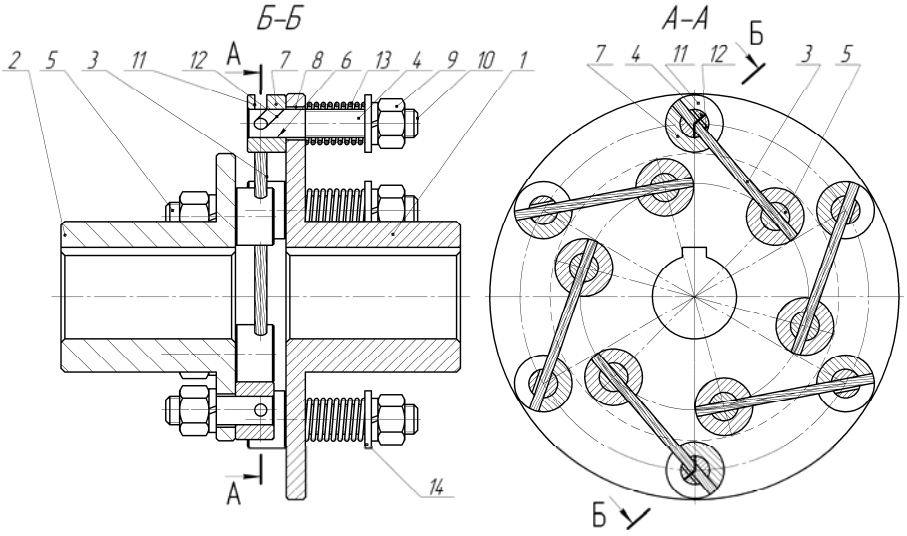

Рис. 1. Загальний вид пружно-запобіжної муфти з торцевою установкою канатів тангенціального розташування

Пружно-запобіжна муфта з тангенціальними канатами складається з двох напівмуфт ведучої 1 і веденої 2, що сполучені за рахунок пружних елементів, якими є канати 3, кожен з яких закріплений одним

кінцем в пальці 4 встановленому у ведучій напівмуфті 1, а іншим кінцем в пальці 5 встановленому у веденій напівмуфті 2. Пальці 4 і 5 пропущені в осьові отвори 6 втулок 7 та отвори 8 фланців ведучої і веденої напівмуфт 1 і 2 та затягнуті гайками 9, що встановлені на їх різьбові кінці 10. Канати 3 пропущені в пази 11 втулок 7 і пази 12 пальців 4 і 5. Гайки пальців 4 встановлені з упором на пружини 13 через шайби 14. Пальці 4 і 5 встановлені у своїх напівмуфтах на різних діаметрах.

Для цієї муфти характерні основні геометричні, компоновочні та силові співвідношення отримані раніше для постійної муфти з тангенціально розташованими канатами [5, 6], але функціональне призначення та конструкція цієї муфти обумовлює деякі особливості її розрахунку, зокрема оцінки параметрів пружин які затискають канати. Розкриття механізму спрацьовування роботи муфти та оцінка параметрів швидкодії її роботи становить мету даної роботи.

Основний матеріал і результати. Для розкриття механізму спрацьовування муфти розглянемо її розрахункову схему, показану на рис. 2 та рис. 3.

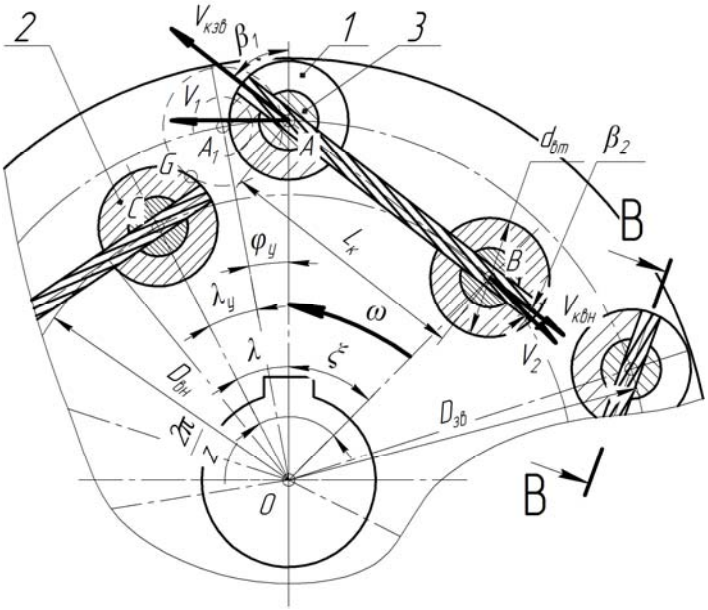

Рис. 2. Розрахункова схема муфти

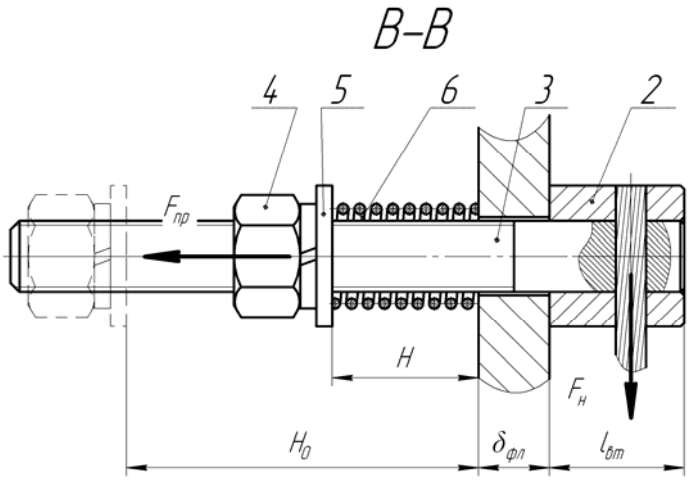

Рис. 3. Розрахункова схема пальця

При роботі муфти в стопорному режимі (найбільш небезпечний варіант) втулки 2, що належать веденій напівмуфті (в даному прикладі це напівмуфта меншого діаметру, або внутрішня) залишаються нерухомими, а втулки 1, що належать ведучій напівмуфті (в даному випадку зовнішній), рухаються ним назустріч. Для виконання муфтою запобіжних функцій, за час удару t_y, коли втулки 1 і 2 зустрінуться в точці G (а центр втулки 1 переміститься при цьому в положення A_1) палець 3 втулки 1 повинен бути екстрагований (за час t_e) з її осьового отвору та отвору фланця ведучої напівмуфти разом із шайбами та гайкою за рахунок стисненої при складанні муфти пружини 6. Таким чином можна записати рівняння можливості виконання муфтою своїх функцій (рівняння швидкодії муфти):

$$t_y \geq t_к + t_e . \quad (1)$$

Для отримання подальших викладок приймемо наступні припущення:

1) Ведена муфта нерухома, а ведуча обертається з постійною кутовою швидкістю ω;

2) Пальці та втулки встановлені з однаковим кутовим кроком;

3) Між пальцями, отворами фланців та отворами втулок наявні гарантовані зазори;

4) Всі z канатів мають однакову довжину;

5) Деталі муфти абсолютно жорсткі;

6) Осі напівмуфт співпадають;

7) Спрацьовування муфти відбувається настільки швидко, що можна вважати рух деталей при цьому рівномірним.

Тоді можна записати для часу удару:

$$t_y = \frac{\varphi_y}{\omega}, \tag{2}$$

де φ_y – кут на який повернеться ведуча напівмуфта до удару (кут удару).

Для визначення кута удару розглянемо спершу чотирикутник $OCAB$, для якого:

$$\frac{2\pi}{z} = \xi + \lambda, \tag{3}$$

де ξ – кут монтажного зміщення напівмуфт (забезпечується при складанні муфти).

$$\lambda = \varphi_y + \lambda_y, \tag{4}$$

$$\varphi_y = \lambda - \lambda_y = \frac{2\pi}{z} - \xi - \lambda_y. \tag{5}$$

З трикутника OCA_1 отримаємо за теоремою косинусів:

$$\begin{gathered} CA_1^2 = OA_1^2 + OC^2 - 2OA_1 \times OC \times \cos\lambda_y, \\ d_{вт}^2 = 0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - 0,5D_{зв}D_{вн}\cos\lambda_y. \end{gathered} \tag{6}$$

Звідки:

$$\lambda_y = \arccos\frac{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - d_{вт}^2}{0,5D_{зв}D_{вн}}. \tag{7}$$

$$\varphi_y = \frac{2\pi}{z} - \xi - \arccos\frac{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - d_{вт}^2}{0,5D_{зв}D_{вн}}. \tag{8}$$

$$t_y = \frac{\frac{2\pi}{z} - \xi - \arccos\frac{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - d_{вт}^2}{0,5D_{зв}D_{вн}}}{\omega}. \tag{9}$$

До екстракції пальця та сполучених з ним деталей канат 3 повинен повністю вийти з контакту зі втулкою 2 та пальцем 3, на це витрачається час $t_к$:

$$t_к = \frac{d_{вт}}{V_к}, \tag{10}$$

де $d_{вт}$ – діаметр втулки;

$V_к$ – швидкість руху каната.

Швидкість каната і відповідно швидкодія муфти буде відрізнятися в залежності від того, яка з напівмуфт буде ведучою. Коли ведучою є зовнішня напівмуфта, швидкість каната $V_{к1}$ буде рівною:

$$V_{кзв} = \frac{V_1}{\sin\beta_1} = \frac{0,5D_{зв}\omega}{\sin\beta_1}. \tag{11}$$

При ведучій внутрішній напівмуфті швидкість каната $V_{к2}$ становитиме:

$$V_{квн} = \frac{V_2}{\cos\beta_2} = \frac{0,5D_{вн}\omega}{\cos\beta_2}. \tag{12}$$

З роботи [5] відомо, що:

$$\sin\beta_1 = \frac{D_{вн}\sin\xi}{2L_к}. \tag{13}$$

$$\cos\beta_2 = \frac{D_{зв}\sin\xi}{2L_к}. \tag{14}$$

Тоді можна записати:

$$V_{кзв} = \omega \frac{D_{зв} L_к}{D_{вн} \sin\xi} = \omega \frac{D_{зв}\sqrt{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}}{D_{вн} \sin\xi}. \quad (15)$$

$$V_{квн} = \omega \frac{D_{вн} L_к}{D_{зв} \sin\xi} = \omega \frac{D_{вн}\sqrt{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}}{D_{зв} \sin\xi}. \quad (16)$$

Звідки час екстракції каната у випадку ведучої зовнішньої напівмуфти (17) та внутрішньої (18):

$$t_{кзв} = \frac{d_{вт} D_{вн} \sin\xi}{\omega D_{зв} L_к} = \frac{d_{вт} D_{вн} \sin\xi}{\omega D_{зв}\sqrt{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}}, \quad (17)$$

$$t_{квн} = \frac{d_{вт} D_{зв} \sin\xi}{\omega D_{вн} L_к} = \frac{d_{вт} D_{зв} \sin\xi}{\omega D_{вн}\sqrt{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}}. \quad (18)$$

З (1) потрібний час екстракції пальця:

$$t_e^{потр} \le t_y - t_к. \quad (19)$$

У випадку ведучої зовнішньої напівмуфти формула (19) матиме вигляд (20), а внутрішньої – (21):

$$t_{езв}^{потр} \le \frac{\frac{2\pi}{z} - \xi - \arccos\frac{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - d_{вт}^2}{0,5 D_{зв} D_{вн}}}{\omega} - \rightarrow$$
$$\rightarrow - \frac{d_{вт} D_{вн} \sin\xi}{\omega D_{зв}\sqrt{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}}. \quad (20)$$

$$t_{евн}^{потр} \le \frac{\frac{2\pi}{z} - \xi - \arccos\frac{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - d_{вт}^2}{0,5 D_{зв} D_{вн}}}{\omega} - \rightarrow$$
$$\rightarrow - \frac{d_{вт} D_{зв} \sin\xi}{\omega D_{вн}\sqrt{0,25(D_{зв}{}^2 + D_{вн}{}^2) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}}. \quad (21)$$

Для визначення дійсного часу екстракції пальця і сполучених з ним деталей розглянемо його рух, використавши теорему про зміну кінетичної енергії [7]. Згідно цієї теореми зміну кінетичної енергії рухомих деталей спричиняють роботи сил стисненої пружини та сил тертя рухомих деталей, що відображає рівняння (22).

$$0,5 m_{пг} V_п^2 = 0,5 c (H_0 - H)^2 - gf(m_{вт} l_{вт} + m_{пг} \delta_{фл}), \quad (22)$$

де $m_{пг}$ – маса рухомих деталей;
$V_п$ – швидкість пальця;
c – швидкість пружини;
$(H_0 - H)$ – деформація пружини;
g – прискорення вільного падіння;
f – коефіцієнт тертя між пальцем та сполученими з ним деталями;
$m_{вт}$ – маса втулки;
$l_{вт}$ – довжина втулки;
$\delta_{фл}$ – товщина фланця.

Тоді швидкість пальця під час екстракції:

$$V_п = \sqrt{\frac{c(H_0 - H)^2 - 2gf(m_{вт} l_{вт} + m_{пг}\delta_{фл})}{m_{пг}}}. \quad (23)$$

Далі отримаємо вираз для обчислення розрахункового часу екстракції:

$$t_e^{розр} = \frac{l_{вт} + \delta_{фл}}{V_п} = \frac{l_{вт} + \delta_{фл}}{\sqrt{\frac{c(H_0 - H)^2 - 2gf(m_{вт} l_{вт} + m_{пг}\delta_{фл})}{m_{пг}}}}. \quad (24)$$

Слід відзначити, що екстракція пальця зі фланця та втулки може бути гарантовано забезпечена коли деформація пружини $(H_0 - H)$ більше або дорівнює сумі товщин втулки та фланця $(l_{вт} + \delta_{фл})$.

Тоді формула (24) набуде вигляду (25):

$$t_e^{розр} = \frac{l_{вт} + \delta_{фл}}{\sqrt{\dfrac{c(l_{вт} + \delta_{фл})^2 - 2gf(m_{вт} l_{вт} + m_{пг}\delta_{фл})}{m_{пг}}}}. \quad (25)$$

Чисельний розрахунок для натурного зразка муфти у якої z = 5, $m_{вт}$ = 0,043 кг, $m_{пг}$ = 0,112 кг , $l_{вт}$ = 0,016 м, $\delta_{фл}$ = 0,008 м, $d_{вт}$ = 0,024 м, $D_{зв}$ = 0,145 м, $D_{вн}$ = 0,125 м c = 31250 Н/м, f = 0,15, показав, що у формулі (25) складова пов'язана з роботою сили тертя складає лише 0,03% від складової енергії стисненої пружини, тому якщо знехтувати тертям, формулу (25) можна перетворити до компактного вигляду (26).

$$t_e^{розр} = \frac{l_{вт} + \delta_{фл}}{\sqrt{\dfrac{c(l_{вт} + \delta_{фл})^2}{m_{пг}}}} = \sqrt{\frac{m_{пг}}{c}}. \quad (26)$$

Підставляючи вираз (26) у (20) та (21) можна отримати формули для розрахунку граничної частоти обертання при якій муфта здатна виконувати свої запобіжні функції:

У випадку ведучої зовнішньої напівмуфти:

$$\omega_{зв} \le \sqrt{\frac{c}{m_{пг}}} \left[\frac{2\pi}{z} - \xi - \arccos \frac{0,25(D_{зв}^{\ 2} + D_{вн}^{\ 2}) - d_{вт}^2}{0,5 D_{зв} D_{вн}} - \rightarrow \right.$$
$$\left. \rightarrow \frac{d_{вт} D_{вн} \sin\xi}{D_{зв}\sqrt{0,25(D_{зв}^{\ 2} + D_{вн}^{\ 2}) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}} \right]. \quad (27)$$

У випадку ведучої внутрішньої напівмуфти:

$$\omega_{вн} \le \sqrt{\frac{c}{m_{пг}}} \left[\frac{2\pi}{z} - \xi - \arccos \frac{0,25(D_{зв}^{\ 2} + D_{вн}^{\ 2}) - d_{вт}^2}{0,5 D_{зв} D_{вн}} - \rightarrow \right.$$
$$\left. \rightarrow \frac{d_{вт} D_{зв} \sin\xi}{D_{вн}\sqrt{0,25(D_{зв}^{\ 2} + D_{вн}^{\ 2}) - 0,5 D_{зв} D_{вн} \cos\xi}} \right]. \quad (28)$$

Користування отриманими виразами може виконуватись в наступним чином:

а) при відомих з виконаного розрахунку на міцність розмірах та частоті обертання муфти можна перевіряти можливість її роботи як запобіжної, обчислюючи розрахунковий час екстракції пальця за формулою (26) та порівнювати його з потрібним часом екстракції (20) чи (21);

б) при тих же умовах, обчислення допустимої кутової швидкості муфти за формулами (27) чи (28) та порівняння її з проектною кутовою швидкістю також дасть можливість відповісти на запитання чи здатна муфта виконувати свої запобіжні функції.

За отриманими формулами (17), (18), (26) для модельної муфти при кутовій швидкості обертання ω = 50 рад/с, побудований графік залежності часу її спрацювання від кута монтажного зміщення ξ (рис. 4). На рис. 5 показано графік залежності критичної частоти обертання від кута монтажного зміщення. Штриховою лінією на рис. 4 і 5 показані графіки при ведучій зовнішній напівмуфті, а осьовою – при ведучій внутрішній напівмуфті.

З графіка рис. 4 видно, що умова (1) виконується у випадку ведучої зовнішньої напівмуфти при кутах ξ менше 28º, при ведучій внутрішній напівмуфті – при кутах ξ менше 23º.

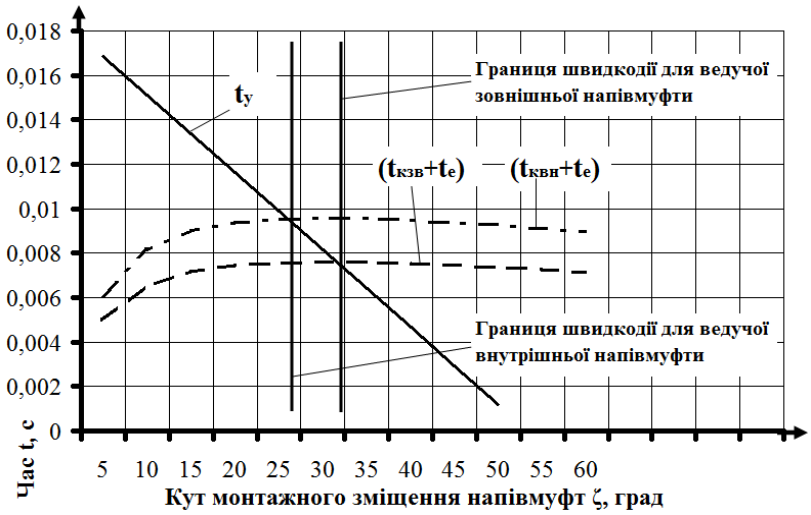

Рис. 4. Графік впливу кута монтажного зміщення напівмуфт ξ на параметри швидкодії муфти

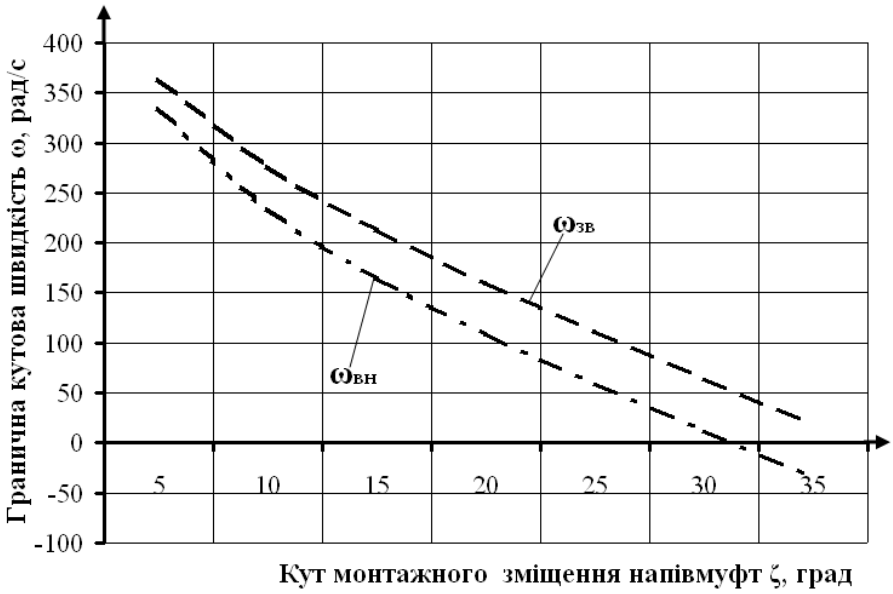

Рис. 5. Графік впливу кута монтажного зміщення напівмуфт ξ на граничну кутову швидкість обертання муфти

В результаті виконаних досліджень можна зробити наступні **висновки:**

1. Отримані залежності, що дозволяють оцінити геометричні та кінематичні можливості роботи муфти з канатами тангенціального розташування як запобіжної у випадку ведучої зовнішньої та внутрішньої напівмуфт. Для цих же варіантів отримані формули для обчислення часу спрацьовування муфти та критичної частоти обертання при якій муфта здатна виконувати свої запобіжні функції.

2. Показано, що під час розрахунку часу екстракції пальця впливом тертя на швидкість та час екстракції можна знехтувати.

Література

1. Малащенко В.О. Навантажувальна здатність приводів великомасових систем : монографія / Малащенко В.О., Куновський Г.П. – Лівів : «Новий світ-2000», 2016. – 150 с.

2. Артюх В.Г. Розвиток теоретичних основ і практика захисту металургійних машин від поломок : автореферат дис. На здобуття наук. ступеня докт. техн. Наук : 05.05.08 / В.Г. Артюх ; Донецьк. нац. техн. ун-т. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 34 с.

3. Малащенко В.О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків / В.О. Малащенко. – Львів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 208 с.

4. Есипенко Я.И. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки / Я.И. Есипенко, А.З. Паламаренко, М.К. Афанасьев. − К. : Техніка, 1972. − 168 с.

5. Проценко В.О. Геометричні та силові параметри муфти з торцевою установкою канатів тангенціального розташування / В.О. Проценко, В.О. Настасенко, О.Ю. Клементьєва // Підйомно-транспортна техніка. Науково-технічний та виробничий журнал. – Одеса : ІНТЕРПРІНТ, 2015. – № 4. – С. 53–59.

6. Проценко В.О. Особливості компоновки муфт з торцевою установкою канатів тангенціального розташування / В.О. Проценко, О.Ю. Клементьєва // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тем вип.: Проблеми механічного приводу. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 23 (1195). – С. 134–137.

7. Павловський М.А. Теоретична механіка / Павловський М.А. – К. : Техніка, 2002. – 510 с.

Рецензія/Peer review : 27.12.2016 р. Надрукована/Printed :1.2.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Букетов А.В.