

УДК 621.825

Проценко В. О., к.т.н.

Херсонська державна морська академія

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КАНАТНО-РОЛИКОВОЇ МУФТИ В УМОВАХ НЕСПІВВІСНОСТІ

**Анотація.** Розроблено математичну модель роботи канатно-роликової муфти в умовах неспіввісності, яка дала можливість обчислити видовження каната та радіальне навантаження від муфти на сполучені вали в залежності від кута повороту муфти. Встановлено, що видовження каната та радіальне навантаження від муфти на вали змінюються за несиметричним знакопостійним циклом. Конструкція муфти забезпечує мінімальну величину видовження каната та відповідно навантаження від муфти на вали. Сумарний натяг каната від робочого навантаження та неспіввісності при роботі муфти також змінюється за асиметричним знакопостійним циклом, тобто прослаблення каната при роботі муфти виключене. Зі збільшенням величини неспіввісності зростає амплітуда сили натягу та напружень розтягу в дротинах, а коефіцієнт асиметрії циклу розтягу каната при обертанні муфти зменшується.

**Ключові слова:** муфта, канат, неспіввісність, момент, привід.

**Анотация.** Разработана математическая модель работы канатно-роликовой муфты в условиях несоосности, которая дала возможность вычислить удлинение каната и радиальную нагрузку от муфты на соединенные валы в зависимости от угла поворота муфты. Установлено, что удлинение каната и радиальная нагрузка от муфты на валы изменяются по несимметричному знакопостоянному циклу. Конструкция муфты обеспечивает минимальную величину удлинения каната и соответственно нагрузку от муфты на валы. Суммарное натяжение каната от рабочей нагрузки и несоосности при работе муфты также изменяется по асимметричному знакопостоянному циклу, то есть прослабление каната при работе муфты исключено. С увеличением величины несоосности возрастает амплитуда силы натяжения каната и напряжений растяжения в проволоках, а коэффициент асимметрии цикла растяжения каната снижается.

**Ключевые слова:** муфта, канат, несоосность, момент, привод.

**Annotation.** Mathematical model for the operation of a rope-roller coupling under misalignment conditions has been developed, which made it

---

©Проценко В. О.,

*possible to calculate the rope elongation and the radial load from the coupling on the connected shafts, depending on the angle of coupling rotation. It has been established that the rope elongation and the radial load from the coupling to the shafts change in an asymmetric constant-sign cycle. The design of the coupling provides the minimum amount of rope extension and, correspondingly, the coupling load on the shafts. The total tension of the rope from the work load and misalignment during the operation of the coupling also changes in an asymmetric constant-cycle, that is, the weakening of the rope during the operation of the coupling is excluded. With an increase in misalignment, the amplitude of the tension force of the rope and tensile stresses in the wires increases and the coefficient of asymmetry of the rope's stretching cycle decreases.*

**Keywords:** coupling, rope, misalignment, torque, transmission.

**Вступ.** При будь-яких уявних перспективах тієї чи іншої конструкції, однозначний висновок можна отримати, виконавши експериментальну оцінку або розрахунок основних якісних її показників. Для муфт одним із найголовніших показників є компенсуюча здатність [1], яка зокрема характеризується силовою дією муфти на вали – радіальним навантаженням, яке в свою чергу пов’язує радіальну жорсткість муфти та власне радіальну неспіввісність  $\Delta_r$ . Тому оцінка радіального навантаження на вали при роботі муфт в умовах радіальної неспіввісності становить важливу задачу.

**Постановка задачі.** Задачами даного дослідження є вивчення роботи нової муфти в умовах радіальної неспіввісності – розкрити механізм передачі навантаження, отримати вирази для обчислення видовження каната та навантаження на вали, а також вплив конструктивних параметрів муфти на ці навантаження, а також встановити характер прикладення радіального навантаження до валів, сполучених муфтою.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо роботу муфти в умовах радіальної неспіввісності  $\Delta_r$ . При цьому (рис. 1) центр веденої напівмуфти в якій закріплено осі роликів зміститься на величину  $\Delta_r$  з точки  $O$  в точку  $O_1$ . При цьому при обертанні муфти змінюються ряд відстаней  $AB$ ,  $SA$ , дуга  $SR$  за рахунок зміни кутів  $\beta_1, \beta_2, \beta_4 - \beta_7$  та кута монтажного зміщення  $\xi$ . Для аналізу зміни параметрів муфти точки розрахункової схеми, що відносяться до ролика та каната, які знаходяться над площиною радіального зміщення (площина в якій лежать осі зміщених валів) позначимо індексом 1, а ті, що знаходяться під площиною зміщення - індексом 2. Відповідно кути - одним штрихом та двома штрихами. Таким чином ділянка каната  $O_1R_1S_1A_1$ , що розташована над площиною радіального зміщення стане довшою за

ділянку  $O_1R_2S_2A_2$  під площиною зміщення за рахунок збільшення довжини відрізка  $S_1A_1$  порівняно з  $S_2A_2$  та довжини дуги  $R_1S_1$  порівняно з  $R_2S_2$  (за рахунок збільшення кута охоплення ролика  $\beta_2^I$  порівняно з кутом  $\beta_2^{II}$ ). Для оцінки видовження каната та відповідно навантаження на вали від муфти за наявності радіальної неспіввісності  $\Delta_r$  необхідно знайти довжину каната в таких умовах, а ця задача зводиться до знаходження довжини згаданих ділянок  $O_1R_1S_1A_1$  та  $O_1R_2S_2A_2$ , а відповідно і кутів  $\beta_2^I = \beta_5^I + \beta_6^I + \beta_7^I$  та  $\beta_2^{II} = \beta_5^{II} + \beta_6^{II} + \beta_7^{II}$ . Для знаходження цих кутів необхідно визначити також зведені кути монтажного зміщення  $\xi_1^I$  та  $\xi_2^I$ . Всі параметри необхідно визначити в залежності від кута повороту муфти відносно площини радіального зміщення для оцінки зміни параметрів муфти при обертанні.

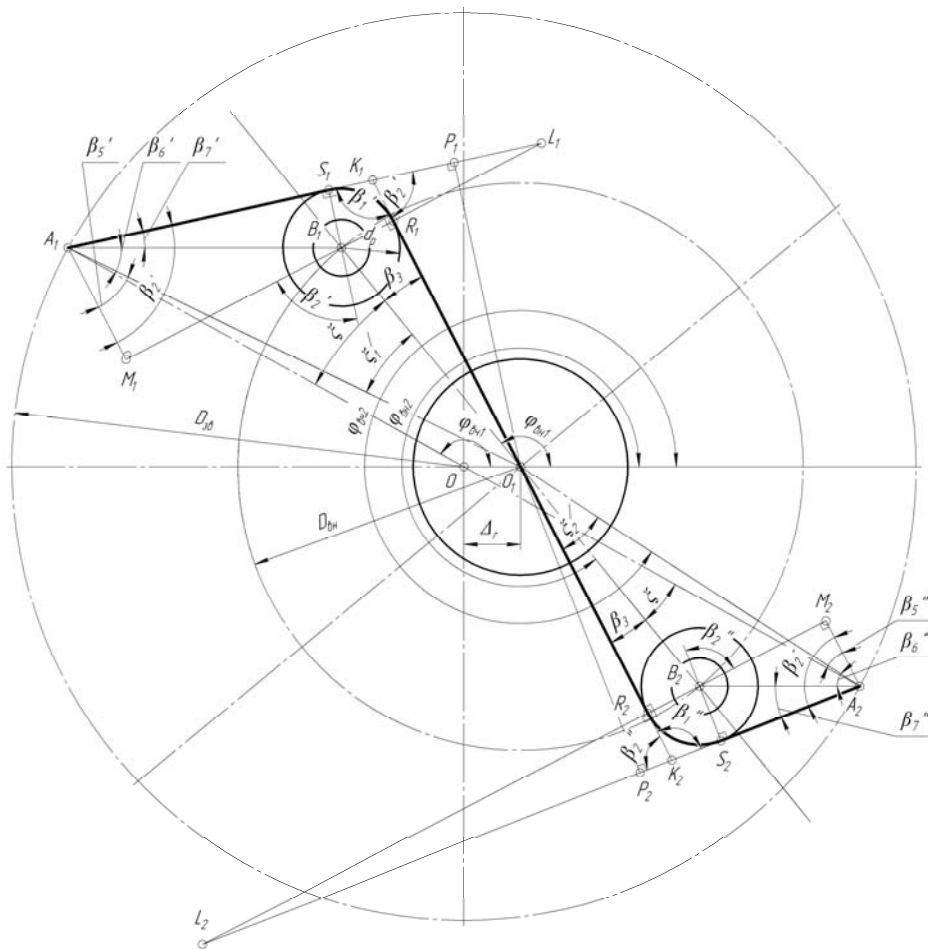


Рисунок 1 – Схема до геометричного розрахунку муфти при роботі в умовах радіальної неспіввісності

Відстань  $AB$  в будь-якому положенні визначена раніше методом замкнених векторних контурів становить [2]:

$$L_{A_i B_i} = \sqrt{\left[ \Delta_r + 0,5D_{\text{вн}} \cos \varphi_{\text{вн}i} - 0,5D_{\text{зв}} \cos \varphi_{\text{вч}i} \right]^2 + \left[ 0,5D_{\text{вн}} \sin \varphi_{\text{вн}i} - 0,5D_{\text{зв}} \sin \varphi_{\text{вч}i} \right]^2}, \quad (1)$$

Повертаючись до рис. 1, з трикутника  $OA_1O_1$  можемо записати:

$$\begin{aligned} A_1O_1 &= \sqrt{OO_1^2 + OA_1^2 - 2 \times OO_1 \times OA_1 \cos \varphi_{\text{вч}1}}, \\ L_{A_1O_1} &= \sqrt{\Delta_r^2 + 0,25D_{\text{зв}}^2 - \Delta_r \times D_{\text{зв}} \cos \varphi_{\text{вч}1}}, \\ L_{A_1O_i} &= \sqrt{\Delta_r^2 + 0,25D_{\text{зв}}^2 - \Delta_r \times D_{\text{зв}} \cos \varphi_{\text{вч}i}}. \end{aligned} \quad (2)$$

З трикутника  $O_1A_1B_1$  матимемо за теоремою косинусів:

$$A_1B_1^2 = A_1O_1^2 + O_1B_1^2 - 2 \times A_1O_1 \times O_1B_1 \cos \xi_1', \quad (3)$$

звідки отримаємо:

$$\begin{aligned} \xi_1' &= \arccos \left[ \frac{A_1O_1^2 + O_1B_1^2 - A_1B_1^2}{2 \times A_1O_1 \times O_1B_1} \right], \\ \xi_1' &= \arccos \left[ \frac{L_{A_1O_1}^2 + 0,25D_{\text{вн}}^2 - L_{A_1B_1}^2}{L_{A_1O_1} D_{\text{вн}}} \right], \text{ або в загальному вигляді} \\ \xi_i' &= \arccos \left[ \frac{L_{A_1O_i}^2 + 0,25D_{\text{вн}}^2 - L_{A_iB_i}^2}{L_{A_1O_i} D_{\text{вн}}} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Далі можна використовувати отримані раніше формули підставляючи замість  $\xi$  зведений кут  $\xi_i'$ .

$$\begin{aligned} \beta_2^i &= \xi_i' + \beta_3 + \beta_6^i + \beta_7^i = \\ &= \xi_i' + \arcsin \frac{d_p}{D_{\text{вн}}} + \arcsin \left( \frac{0,5D_{\text{вн}}}{L_{A_iB_i}} \sin \xi_i' \right) + \arcsin \left( \frac{0,5d_p}{L_{A_iB_i}} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\beta_1^i = 180 - \beta_2^i, \quad (6)$$

де  $d_p$  - діаметр ролика.

Відповідно довжина каната у кожному положенні муфти становитиме:

$$L_{\kappa\Delta} = L_{\kappa1} + L_{\kappa2}, \quad (7)$$

де  $L_{\kappa1} = S_1A_1 + R_1S_1 + O_1R_1$  - довжина відрізка каната над площиною радіального зміщення;

$L_{\kappa2} = S_2A_2 + R_2S_2 + O_2R_2$  - довжина відрізка каната під площиною радіального зміщення.

Де:

$$S_i A_i = A_i B_i \cos \beta_7 = L_{A_i B_i} \cos \left( \arcsin \frac{0,5d_p}{L_{A_i B_i}} \right). \quad (8)$$

$$R_i S_i = \frac{\pi d_p}{360} \beta_2^i. \quad (9)$$

$$O_1 R_1 = O_2 R_2 = 0,5D_{\text{вн}} \cos \beta_3 = 0,5D_{\text{вн}} \cos \left( \arcsin \frac{d_p}{D_{\text{вн}}} \right). \quad (10)$$

Видовження каната порівняно з довжиною  $L_{\kappa}$  каната в муфті, що сполучає співвісні вали становитиме:

$$\Delta L_{\kappa} = L_{\kappa\Delta} - L_{\kappa}. \quad (11)$$

$$L_{\kappa} = 2 \left( 0,5D_{\text{вн}} \cos \beta_3 + \frac{\pi d_p}{360} \beta_2 + L_{AB} \cos \beta_7 \right). \quad (12)$$

Радіальне навантаження на вали від деформації каната становитиме:

$$F_{\text{рад}} = A_{\Sigma} E_{\kappa} \frac{\Delta L_{\kappa}}{L_{\kappa}}, \quad (13)$$

де  $A_{\Sigma}$  - сумарна площа дротин каната;

$E_{\kappa} = 1,0 \times 10^5$  МПа - модуль пружності каната при розтягу [3].

Для ілюстрації отриманих теоретичних викладок виконаємо моделювання для муфти з наступними параметрами:  $D_{\text{зв}} = 120$  мм,  $D_{\text{вн}} = 65$  мм,  $d_p = 20$  мм,  $\xi = 45^\circ$ . Довжина каната при відсутності радіального зміщення напівмуфт, розрахована за раніше отриманими формулами складає  $L_{\kappa} = 184,37$  мм. Силовий розрахунок, виконаний за розробленою раніше методикою, показав, що умовам міцності відповідає канат конструкції  $6 \times 7 (1+6) + 1$  о.с. ЛК-О ГОСТ 3069 діаметром  $d_{\kappa} = 2,2$  мм з сумарною площею дротин  $A_{\Sigma} = 1,64$  мм<sup>2</sup> та розривним зусиллям 2555 Н (маркерувальна група 1770 МПа). Радіальне зміщення модельної муфти для наочності приймали  $\Delta_r = 0,5$  мм - вдвічі більше ніж допустиме радіальне зміщення для муфти-прототипа ROTEX SIZE 28, для якої допускається лише  $[\Delta_r] = 0,25$  мм.

Кут повороту муфти  $\varphi_i$  змінювали в діапазоні  $0 \dots 360^\circ$  через  $30^\circ$ , відповідно кути розташування елементів муфти обчислювали за формулами:

$$\varphi_{\text{вчлі}} = \varphi_i, \quad (14)$$

$$\varphi_{\text{внлі}} = \varphi_i - \xi, \quad (15)$$

$$\varphi_{вч2i} = \varphi_{вч1i} + \pi, \quad (16)$$

$$\varphi_{вн2i} = \varphi_{вн1i} + \pi. \quad (17)$$

Звідки за формулою (1) визначали в кожному положенні відстані  $L_{A_1B_1}$  та  $L_{A_2B_2}$ , за формулою (2) відстані  $L_{A_1O_1}$  та  $L_{A_2O_2}$ , далі за формулою (4) зведені кути монтажного зміщення  $\xi_1'$  та  $\xi_2'$ , кути  $\beta_2'$ ,  $\beta_2''$ ,  $\beta_1'$ ,  $\beta_1''$ , та відповідно довжину каната  $L_k$  для співвісної (12) та неспіввісної  $L_{k\Delta}$  (7) муфти, видовження каната  $\Delta L_k$  (11), а також радіальне навантаження  $F_{рад}$  від муфти на вали (13).

Результати моделювання показані на рис. 2, з якого можна зробити наступні висновки. Видовження каната та зміна радіального навантаження від муфти на вали відбувається за асиметричним знакопостійним циклом. При цьому максимальне видовження каната складає 0,0055 мм, що є в 9 разів менше за неспіввісність при якій виконане моделювання. При цьому максимальне радіальне навантаження на вали становить близько 5 Н (0,5 кгс), що ілюструє високу компенсуючу здатність муфти - при модельованій радіальній неспіввісності 0,5 мм її жорсткість складе близько 10 Н/мм. Муфти адекватної навантажувальної здатності інших типів (наприклад з пружною зірочкою та втулково-пальцева) створюватимуть радіальні навантаження набагато більші.

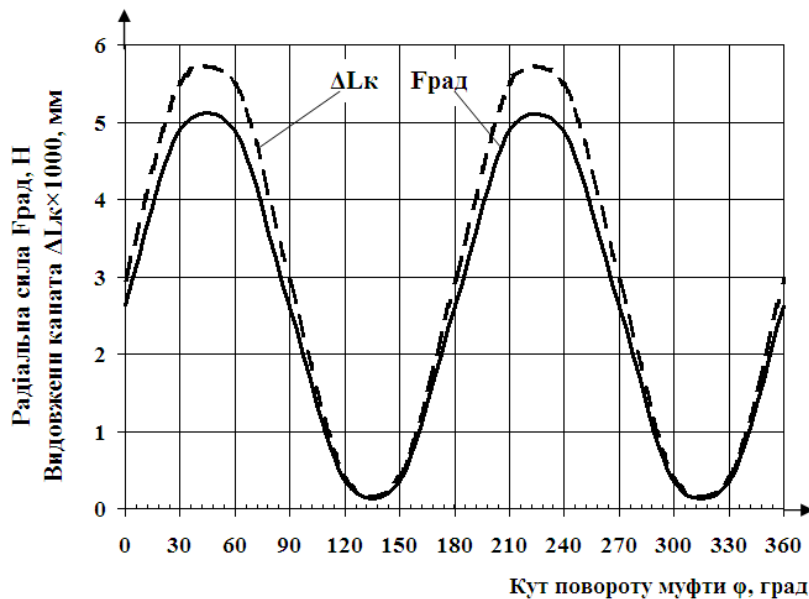


Рисунок 2 – Графік зміни видовження каната та радіального навантаження на вали

На рис. 3 показано графік зміни сумарного натягу каната  $F_{н\Delta}$  (18) модельної муфти в залежності від кута її повороту при різних

значеннях радіальної неспіввідності  $\Delta_r = 0,5$  мм; 1,5 мм; 2,5 мм; 3,5 мм. Зусилля натягу каната, що відповідає робочому навантаженню муфти визначали за отриманими раніше формулами.

$$F_{H\Delta} = F_H + F_{рад} \cdot \quad (18)$$

На зусилля (18) необхідно розраховувати на статичну міцність деталі муфти та затискні елементи для канатів.

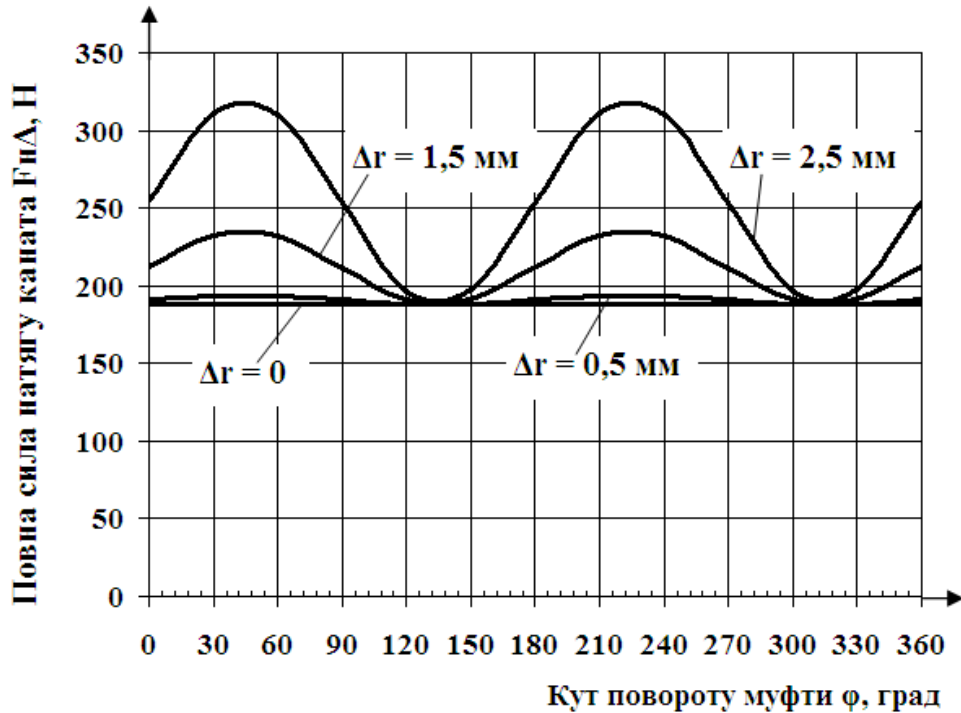


Рисунок 3 – Графік зміни видовження каната та радіального навантаження на вали

Графік на рис. 3 підтверджує, що натяг каната при роботі муфти в умовах радіальної неспіввідності змінюється за асиметричним знакопостійним циклом. При чому зі збільшенням величини неспіввідності зростає амплітуда натягу та напружень розтягу в канаті, а коефіцієнт  $R$  асиметрії циклу [4] розтягу каната при обертанні муфти зменшується. Так при радіальній неспіввідності  $\Delta_r = 0,5$  мм сумарний максимальний натяг каната збільшується (при куті повороту приблизно  $50^\circ$ ) порівняно зі співвісною муфтою з 188 Н ( $\Delta_r = 0$ ) до 195 Н (збільшення на 3% ( $R = 0,96$ )), при радіальній неспіввідності  $\Delta_r = 1,5$  мм максимальний натяг становить уже близько 235 Н (збільшується на 25% ( $R = 0,80$ )) при наявності радіальної неспіввідності у  $\Delta_r = 2,5$  мм максимальний натяг каната становить вже 312 Н (приріст 70% ( $R =$

0,60)), при подальшому зростанні радіального зміщення до  $\Delta_r = 3,5$  мм він становитиме 430 Н (більше за робочий натяг на 130% ( $R = 0,44$ )). Очевидно в останньому випадку при роботі муфти коефіцієнт запасу міцності, закладений при виборі канату зменшується більше ніж вдвічі. Цей факт потрібно враховувати при розрахунку муфти, передбачаючи при підборі каната можливу неспіввісність та відповідно додатковий натяг каната від цієї неспіввісності. Взагалі кажучи, коефіцієнт запасу міцності при підборі каната для муфти потрібно розглядати диференційовано – він повинен враховувати: запас за основним робочим натягом, що відповідає номінальному моменту муфти, запас на можливий приріст натягу від неспіввісності, та запас на динамічні навантаження, що виникають при роботі муфти під час неусталених режимів пуску та зупинки, а також динамічність робочого режиму агрегату, що оснащений муфтою. Такий підхід відомий [5], проте в ньому не враховано як раз неспіввісність сполучених муфтою валів. Зазвичай додаткові навантаження на пружні елементи від неспіввісності враховується обмеженням величини неспіввісності регламентуючими документами на муфти. Такий підхід приводить в свою чергу до недовикористання міцності пружного елемента муфти.

За рахунок виконаних в роботі теоретичних досліджень можна зробити наступні **висновки**:

1. Розроблено математичну модель роботи канатно-роlikової муфти в умовах неспіввісності, яка дала можливість обчислити видовження каната та радіальне навантаження від муфти на сполучені вали в залежності від кута повороту муфти.

2. Встановлено, що видовження каната та радіальне навантаження від муфти на вали змінюються за несиметричним знакопостійним циклом, досягаючи максимуму в положенні коли вісь каната  $R/R_2$  наближається до вектора радіального зміщення  $OO_1$ .

3. Конструкція муфти забезпечує мінімальну величину видовження каната та відповідно навантаження від муфти на вали. Модельна муфта, наприклад, при радіальній неспіввісності сполучених валів 0,5 мм має найбільше видовження каната на рівні 5,5 мкм та при цьому створює радіальне навантаження близько 5Н.

4. Сумарний натяг каната від робочого навантаження та неспіввісності при роботі муфти також змінюється за асиметричним знакопостійним циклом, тобто прослаблення каната при роботі муфти виключене у всіх випадках. При чому зі збільшенням величини неспіввісності зростає амплітуда сили натягу та напружень розтягу в дrotинах каната, а коефіцієнт  $R$  асиметрії циклу розтягу каната при обертанні муфти зменшується. Так для модельної муфти при радіальній неспіввісності  $\Delta_r = 0,5$  мм сумарний максимальний натяг каната збільшується (при куті повороту приблизно  $50^\circ$ ) порівняно зі



співвісною муфтою з 188 Н ( $\Delta_r = 0$ ) до 195 Н (збільшення на 3% ( $R = 0,96$ )), при радіальній неспіввісності  $\Delta_r = 1,5$  мм максимальний натяг становить уже близько 235 Н (збільшується на 25% ( $R = 0,80$ )) при наявності радіальної неспіввісності у  $\Delta_r = 2,5$  мм максимальний натяг каната становить вже 312 Н (приріст 70% ( $R = 0,60$ )), при подальшому зростанні радіального зміщення до  $\Delta_r = 3,5$  мм він становитиме 430 Н (більше за робочий натяг на 130% ( $R = 0,44$ )).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Малащенко В.О., Куновський Г.П. Навантажувальна здатність приводів великомасових систем. Монографія. – Лівів: «Новий світ-2000», 2016. – 150 с.
2. Проценко В.О. Механізм передачі навантаження муфтами з торцевими канатами в умовах радіальної неспіввісності / В.О. Проценко, О.Ю. Клементьєва // Підйомно-транспортна техніка. Науково-технічний та виробничий журнал. – Одеса: ІНТЕРПРІНТ. – 2016. - №4 – С. 45 - 55.
3. Малиновский В.А. Стальные канаты: аналитический справочник / В.А. Малиновский. – Одесса: Астропринт, 2016. – 252 с.
4. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. – Львів: Афіша, 2003. – 560 с.
5. Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам / Под ред. В.С. Полякова. – Л.: Машиностроение, 1979. – 344 с.