

УДК 621.001.891

МОМЕНТИ СИЛ ТЕРТЯ КОНУСНОГО ВАРІАТОРА ПРИ РІВНОМІРНОМУ РОЗПОДІЛІ ТИСКУ ВЗДОВЖ ЛІНІЇ КОНТАКТУ

*Цілуйко Н.В., аспірант кафедри ВВК, Доценко В.Г., к.т.н., доц.
Кременчуцький державний політехнічний університет ім. М.В. Остроградського
39614, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20
E-mail: nich@polytech.poltava.ua*

В статті приведені формули для определения моментів сил тертя конусного варіатора з жорстким проміжним елементом при рівномірному розподіленні тиску в зоні контакту фрикційних елементів в редукторному і регулювальному режимах роботи варіатора.

Ключевые слова: фрикційні елементи, моменти сил тертя.

In the article the formulas are resulted for determination of moments of forces of friction of cone variator with a hard intermediate element at the even distributing of pressure in the area of contact of friktionnih elements in a reducing gear and regulation the modes of operations of variator.

Key words: friktionnih elements, moments of forces of friction.

Вступ. Розвиток машинобудування і автоматизація виробничих процесів тісно пов'язані з вимогами безступінчатого регулювання швидкості. Для цієї мети, разом з керованими електродвигунами в легкій, текстильній і поліграфічній промисловості широко застосовуються фрикційні варіатори швидкості.

Необхідною умовою надійної роботи, високого к.к.д. і довговічності варіаторів є правильний вибір їх кінематичних і силових параметрів.

Аналіз попередніх досліджень. У загальному випадку в контактних зонах фрикційних елементів (ФЕ) виникають швидкості ковзання, направлені вздовж утворюючих конусів, які спільно зі швидкостями вертіння контактних зон утворюють поле швидкостей ковзання [1]. Це накладає особливості на закон розподілу сил тертя в зонах контакту і вказує на необхідність урахування цих особливостей при дослідженні силової взаємодії ФЕ варіатора.

Мета роботи. Отримання аналітичних залежностей для визначення моментів сил тертя в редукторному і регулювальному режимах роботи варіатора при лінійному контакті ФЕ та рівномірному

розподілі тиску вздовж лінії контакту.

Матеріал і результати дослідження. На рис.1 показана конструктивна схема конусного варіатора, який складається з ведучого 1, відомого 2 конусів і проміжного елемента (ПЕ) 3, затисненого між конусами за допомогою пружини 4. Передача обертання від ведучого конуса до веденого здійснюється за допомогою проміжного елемента 3. Регулювання кутової швидкості відомого конуса здійснюється шляхом примусового переміщення цього елемента вздовж утворюючих конусів за допомогою перевідного механізму, що включає реверсивний електродвигун 5, ходовий гвинт 6 і водилку 7. Даний варіатор має дві контактні зони (рис.1) B_1C_1 і B_2C_2 , утворені фрикційними парами: ведучий конус – ПЕ, ПЕ – відомий конус відповідно з внутрішнім і зовнішнім контактом конусів. Проміжний елемент може бути циліндричним, конічним або тороїдальним.

Усі фрикційні елементи варіатора виготовлені зі сталі ШХ15, термооброблені до твердості HRC 60...62 і працюють у масляній ванні.

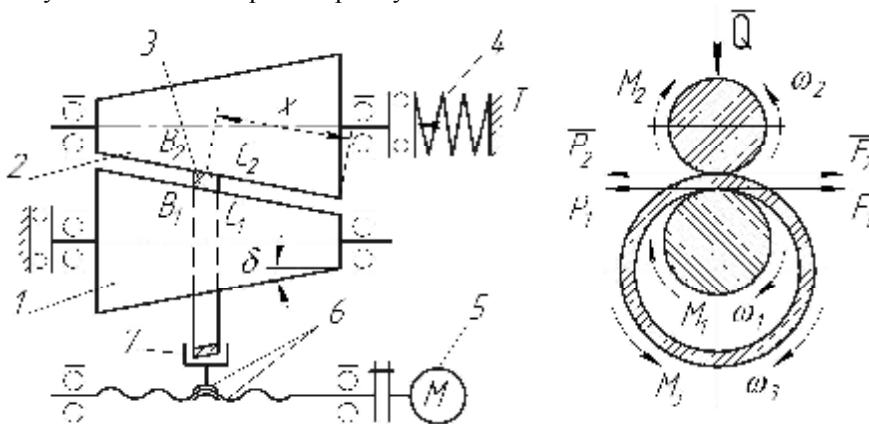


Рисунок 1 – Схема конусного варіатора швидкості з жорстким ПЕ

Робота фрикційного варіатора базується на використанні сил тертя, що виникають у контактних зонах ФЕ. Для забезпечення працездатності варіатора в редукторному і регульовальному режимах ФЕ повинні притискатися один до одного з такою силою Q , щоб у кожний момент часу результуючі моменти від сил тертя, були більше моментів від сил опору, прикладених до відповідних ФЕ.

Уважаючи, що окружні сили опору P_1, P_2 прикладені в центрі відповідних контактних зон, співвідношення між моментами запишеться у вигляді:

$$M_1 = M_2 \frac{R_{1x}}{R_{2x}} \cdot \frac{R'_3}{R_3} \cdot \frac{1}{h}, \quad (1)$$

де $R_{1x} = r + x' \cdot \sin d; R_{2x} = R - x' \sin d$,

R, r – максимальний і мінімальний радіуси конусів;

d – половина кута конусності;

x^c – координата ПЕ, відповідно середній точці лінії контакту;

R_{1x}, R_{2x} – змінні радіуси ведучого і відомого конусів, відповідні середній точці лінії контакту;

R'_3, R_3 – зовнішній і внутрішній радіуси ПЕ, відповідні середній точці лінії контакту;

h – к.к.д. варіатора.

Для надійної роботи варіатора умова працездатності фрикційних пар повинна одночасно виконуватися в контактних зонах B_1C_1 і B_2C_2 . У загальному випадку основна залежність, що визначає працездатність фрикційних пар ведучий конус – ПЕ, ПЕ – відомий конус запишеться у вигляді:

$$M_{T1} = b_1 \cdot M_{1\max}, \quad (2)$$

$$M_{T2} = b_2 \cdot M_{2\max}, \quad (3)$$

де M_{T1}, M_{T2} – результуючі моменти сил тертя, що виникають в контактних зонах B_1C_1, B_2C_2 ;

b_1, b_2 – коефіцієнти запасу зчеплення фрикційних пар ведучий конус – ПЕ, ПЕ – відомий конус;

$M_{1\max}, M_{2\max}$ – максимальні моменти сил опору, прикладені відповідно до ведучого і відомого конусів.

З урахуванням формул (1) - (3) співвідношення між коефіцієнтами запасу зчеплення виражається рівнянням:

$$b_1 = b_2 \frac{R_{2x}}{R_{1x}} \cdot \frac{R_3}{R'_3} \cdot \frac{M_{T1}}{M_{T2}} \cdot h. \quad (4)$$

Величину коефіцієнтів запасу зчеплення необхідно вибирати з таким розрахунком, щоб при всіх можливих перевантаженнях фрикційні передачі були гарантовані від пробуксовок. Необгрунтовано великі значення коефіцієнтів запасу зчеплення істотно збільшують навантаження на всі елементи варіатора, знижують його к.к.д. і довговічність. Для вибору більш низьких значень цих коефіцієнтів необхідно знати закони зміни моментів сил тертя при різних режимах роботи варіатора.

Елементарні сили тертя, що виникають у контактних зонах B_1C_1, B_2C_2 (рис. 1), направлені протилежно результуючим швидкостям ковзання то-

чок цих зон. Тому правомірно припустити, що при переміщенні ПЕ в процесі регулювання кутової швидкості відомого конуса величина моментів сил тертя зменшується і тим істотніше, чим більше швидкість переводу ПЕ. Представляється важливим оцінити вплив цієї швидкості і інших параметрів варіатора на величину моментів сил тертя.

При порівняно невеликих зусиллях притиску (до 1000 Н) сталевих ФЕ, термооброблених до високої твердості, ширина майданчика контакту досить незначна в порівнянні з її довжиною. Тому в першому наближенні шириною майданчика контакту ігноруємо і вважаємо контакт лінійним.

Виберемо рухому систему осей координат P_iX-YZ (рис. 2), початок якої співпадає з полюсом кочення P_i і разом з ним пересуваються в межах лінії контакту.

Елементарний момент сил тертя, прикладений до j -го фрикційного елемента визначається рівнянням:

$$dM_{Tj} = q_i \cdot f_i (r_j + x \sin d) \cdot \cos a_i \cdot dx, \quad (5)$$

де $i = 1, 2$ – номер контактної лінії B_1C_1, B_2C_2 ;

q_i – тиск, що припадає на одиницю довжини контактної лінії;

f_i – коефіцієнт тертя на i -й контактній лінії;

r_j – радіус кола чистого кочення j -го ФЕ;

x – координата точки на лінії контакту;

dx – елементарна ділянка лінії контакту;

a_i – кут нахилу елементарних сил тертя до осі P_iZ .

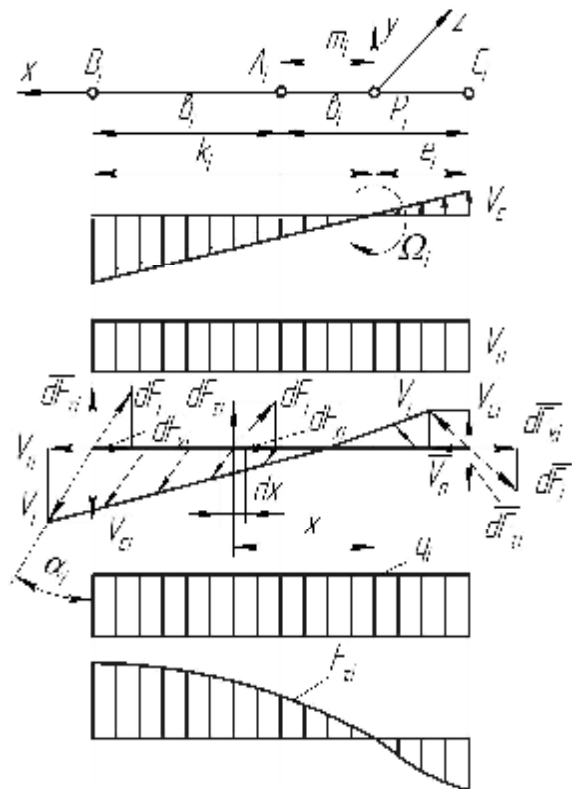


Рисунок 2 – Епюри розподілення швидкостей ковзання V_c, V_n , тиску q_i та сил тертя F_{ti} уздовж лінії контакту

Уважаючи, що закони зміни тиску q_i , коефіцієнта тертя f_i і кута нахилу елементарних сил тертя a_i є гладкими функціями координати X , рівняння для визначення результуючого моменту сил тертя запишеться у вигляді:

$$M_{Tj} = \int_{-e_i}^{k_i} q_i f_i (p_j + x \sin d) \cdot \cos a_i \cdot dx, \quad (6)$$

де $e_i = (b_i - m_i)$ - нижня межа інтегрування;

$k_i = (b_i + m_i)$ - верхня межа інтегрування;

m_i - координата полюса кочення щодо середньої точки i -тої лінії контакту.

Складність рішення рівняння (6) залежить від складності функцій q_i , f_i і a_i .

Закон розподілу тиску вздовж лінії контакту прийемо постійним:

$$q_i = \frac{Q}{2b_i} = const, \quad (7)$$

де Q - зусилля притиску ФЕ;

$2b_i$ - довжина i -тої лінії контакту.

Зміна коефіцієнта тертя фрикційних пар, що працюють в масляній ванні, вповодж лінії контакту не перевищує 5% [2]. Тому в розрахунках приймаємо деякий узагальнений коефіцієнт f_i , незалежний від x .

Згідно із дослідженнями [1]:

$$\cos a_i = \frac{x}{\sqrt{x^2 + d_{ni}^2}}, \quad (8)$$

де d_{ni} - параметр, що має розмірність довжини і незалежний від координати x .

Рівняння (6), з урахуванням (7), (8) запишеться у вигляді:

$$M_{Tj} = \frac{Q}{2b_i} f_i \int_{-e_i}^{k_i} (r_j + x \sin d) \frac{x}{\sqrt{x^2 + d_{ni}^2}} \cdot dx. \quad (9)$$

Після інтегрування рівняння (9) відповідних підстановок і перетворення отримаємо:

$$M_{Tj} = \frac{Q_i f_i}{2b_i} r_j \left[\frac{\sqrt{(b_i + m_i)^2 + d_i^2} -}{-\sqrt{(b_i - m_i)^2 + d_i^2}} \right] + \frac{Q_i f_i \sin d}{2b_i} \left\{ \left[\frac{(b_i + m_i) \sqrt{(b_i + m_i)^2 + d_i^2} +}{(b_i - m_i) \sqrt{(b_i - m_i)^2 + d_i^2}} \right] - \left[\frac{-d_i^2 \ln \frac{\sqrt{(b_i + m_i)^2 + d_i^2} + (b_i + m_i)}{\sqrt{(b_i - m_i)^2 + d_i^2} - (b_i - m_i)}}{\sqrt{(b_i - m_i)^2 + d_i^2} - (b_i - m_i)} \right] \right\} \quad (10)$$

У рівнянні (10) перший член є моментом результуючої сили тертя в окружному напрямі, умовно перенесений в полюс кочення. Другий член рівняння враховує неоднократність плечей елемен-

тарних сил тертя щодо цього полюса. Дане рівняння достатньо точно відображає процес взаємодії фрикційних елементів варіатора на регульовальних режимах роботи і при перехрещенні вісей обертання ФЕ.

Аналіз рівняння (10) показує, що за інших рівних умов величина моментів сил тертя істотно залежить від швидкості переводу ПЕ (параметр d_i) і положення полюса кочення на лінії контакту (параметр m_i).

При розрахунку моментів сил тертя з метою скорочення кількості незалежних розрахункових параметрів доцільно представити рівняння (10) у безрозмірному вигляді:

$$\bar{M}_{Tj} = \frac{M_{Tj}}{Q \cdot f_i \cdot R_j} = 0,5(1 - m_i \cdot S_i) \left[\frac{\sqrt{(1 + m_i)^2 + \Delta_i^2} -}{-\sqrt{(1 - m_i)^2 + \Delta_i^2}} \right] + 0,25S_i \left[\frac{(1 + m_i) \sqrt{(1 + m_i)^2 + \Delta_i^2} +}{(1 - m_i) \sqrt{(1 - m_i)^2 + \Delta_i^2} -} - \Delta_i^2 \ln \frac{\sqrt{(1 + m_i)^2 + \Delta_i^2} + (1 + m_i)}{\sqrt{(1 - m_i)^2 + \Delta_i^2} - (1 - m_i)} \right], \quad (11)$$

де $m_i = \frac{m_i}{b_i}$; $S_i = \frac{\epsilon_i \cdot \sin d}{R_j}$; $\Delta_i = \frac{d_i}{\epsilon_i}$;

R_j - радіус кола j -го фрикційного елемента, відповідний середній точці лінії контакту.

Значимою є величина граничних моментів сил тертя, які можуть бути реалізовані фрикційними парами варіатора. Це досягається, коли полюс кочення P_i займає граничне положення на лінії контакту. В цьому випадку рівняння для визначення граничного моменту сил тертя має вигляд:

$$M_{j \max} = \frac{Q f_i}{2b_i} \left[\begin{aligned} & R_j \left(\sqrt{4b_i^2 + d_i^2} - d_i \right) + 0,5 \sin d \times \\ & \times \left(2b_i \sqrt{4b_i^2 + d_i^2} + d_i \right) - \\ & - d_i^2 \ln \left| \frac{\sqrt{4b_i^2 + d_i^2} + 2b_i}{d_i} \right| \end{aligned} \right] \quad (12)$$

або в безрозмірній формі:

$$\bar{M}_{j \max} = Q f_i R_j \left[\begin{aligned} & 0,5 \left(\sqrt{4 + \Delta_i^2} - \Delta_i \right) + \\ & + 0,25 S_i \left(2 \sqrt{4 + \Delta_i^2} + \Delta_i \right) - \\ & - \Delta_i^2 \ln \left| \frac{\sqrt{4 + \Delta_i^2} + 2}{\Delta_i} \right| \end{aligned} \right]. \quad (13)$$

При роботі варіатора в режимі редуктора, коли ПЕ не переміщається вповдвож утворюючих конусів і вісі обертання ФЕ не перехрещуються, момент сил тертя визначається за формулою:

$$M_j = \frac{Qf_i}{2b_i} [2R_j m_i + (b_i^2 + m_i^2) \sin d], \quad (14)$$

або в безрозмірній формі:

$$\bar{M}_j = Qf_i R_j [m_i + 0,5S_i(1 + m_i)]. \quad (15)$$

Усі величини, що входять у рівняння (12) - (15) ті ж, що й в рівняннях (10), (11).

Для визначення граничних моментів сил тертя в редукторному режимі роботи варіатора необхідно в рівняннях (14), (15) встановити відповідно $m_i = b_i$ і $m_i = 1$.

Рівняння в безрозмірній формі (11), (13), (15) є коефіцієнтами зчеплення ФЕ варіатора, рівними відношенню поточного моменту сил тертя до максимального моменту сил тертя при редукторному режимі роботи варіатора, тобто:

$$K_p = \frac{M_j}{Qf_i R_j}. \quad (16)$$

Граничне максимальне значення коефіцієнта зчеплення рівне 1 при редукторному режимі роботи варіатора.

На рис. 3, 4 показані криві зміни коефіцієнтів зчеплення залежно від параметра m .

Значення параметрів при яких проводилися обчислення відповідних кривих приведені в табл.1.

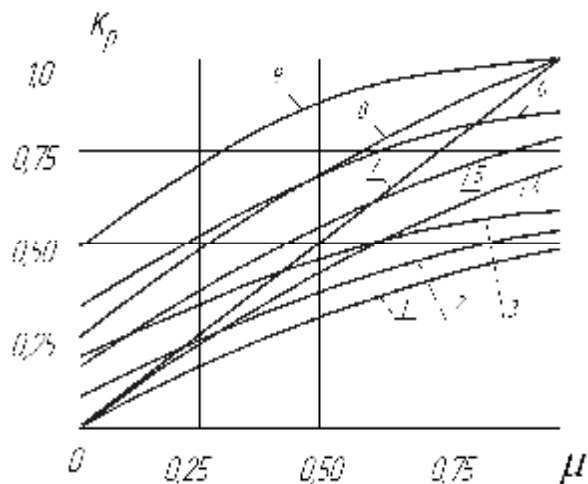


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнтів зчеплення ФЕ залежно від параметрів S і Δ

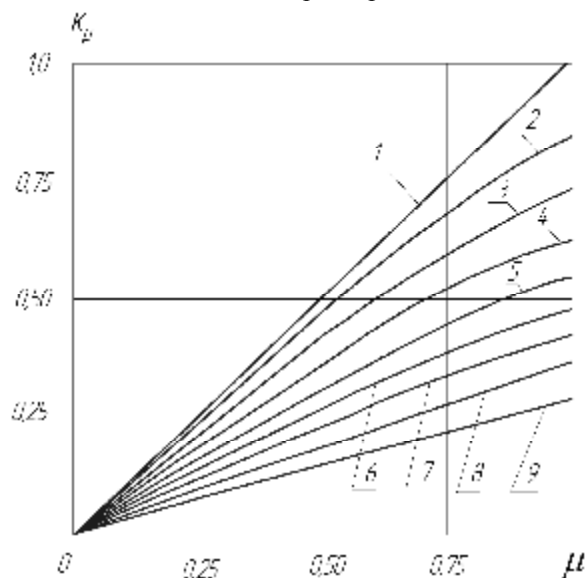


Рисунок 4 – Зміна коефіцієнтів зчеплення залежно від параметрів S і d

Таблиця 1 – Величини параметрів S, D, d при зміні коефіцієнтів зчеплення ФЕ

№ рис.	Номер кривої																	
	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
Значення параметрів																		
рис.3	S	Δ	S	Δ	S	Δ	S	Δ	S	Δ	S	Δ	S	Δ	S	Δ	S	Δ
	0,07	1,67	0,5	1,67	1,0	1,67	0,07	0,67	0,5	0,67	1,0	0,67	0,07	0	0,5	0	1,0	0
рис.4	S	d	S	d	S	d	S	d	S	d	S	d	S	d	S	d	S	d
	0,07	0	0,5	2	1,0	4	0,07	6	0,5	8	1,0	10	0,07	12	0,5	14	1,0	16

Висновки. Отримані рівняння для визначення моментів сил тертя і коефіцієнтів зчеплення при різних режимах роботи варіатора, аналіз яких показав, що в загальному випадку закон розподілу сил тертя в зоні контакту фрикційних елементів достатньо складний і залежить від багатьох конструктивних і кінематичних параметрів варіатора. Результати досліджень дозволяють намітити шляхи оптимізації цих параметрів.

БІБЛЮГРАФІЧНІ ДАНІ

1. Доценко В.Г., Щетинин В.Т. Аналіз кінематических характеристик конусных вариаторов // Вісник КДПУ. - Вип.4, (27). – Кременчук, 2004 – с.13-24.
2. Дроздов Ю.Н., Данилов В.Л. Коэффициенты трения для фрикционных передач, работающих со смазкой. Сборник статей. – М.: Машиностроение, 1986. – 454 с.

Стаття надійшла 31.05.2007 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Саленком О.Ф.