

**Чернець М.В.,\*\* \*\*****Чернець Ю.М.\***

\* Дрогобицький державний педагогічний університет ім. Івана Франка, м. Дрогобич, Україна,

\*\* Люблінський політехнічний інститут, м. Люблін, Польща

E-mail: chernets@drohobych.net

**ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАЧЕПЛЕННЯ  
ЗУБІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЕВОЛЬВЕНТНОЇ  
ПЕРЕДАЧІ НА КОНТАКТНУ МІЦНІСТЬ,  
ЗНОШУВАННЯ І ДОВГОВІЧНІСТЬ.  
ЧАСТИНА 4. ЗМІННІ УМОВИ ВЗАЄМОДІЇ У  
КОРИГОВАНОМУ ЗАЧЕПЛЕННІ**

УДК 539.3: 539.538: 539.621

Згідно методу розрахунку зношування і довговічності зубчастих передач проведено дослідження впливу дво – одно – двопарного зачеплення на максимальні контактні тиски, зношування зубів і довговічність циліндричної передачі при висотному та кутовому коригуванні за змінних внаслідок зношування зубів умов їх контакту. Встановлено закономірності зміни трибоконтактних тисків у зачепленні після досягнення допустимого зношування у залежності від величин коефіцієнтів зміщення та виду коригування. Спостерігається суттєве зниження максимальних трибоконтактних тисків у вхідній фазі двопарного зачеплення. Дійсна довговічність передачі при врахуванні зростання радіусів кривини профілів зубів є в 1,1 ... 1,21 рази більшою, ніж згідно спрощеного методу, який передбачає постійні умови взаємодії зубів.

**Ключові слова:** циліндрична евольвентна зубчаста передача, дво – одно – двопарне зачеплення, коригування зачеплення, зміна кривини зубів внаслідок зношування, контактний тиск, зношування зубів, довговічність передачі

Коригування зачеплення широко використовується у зубчастих передачах. Попередньо у роботі [1] було розглянуто його вплив на характеристики контакту, зношування та довговічність з урахуванням мішаного зачеплення при постійних умовах трибоконтактною взаємодії зубів. Однак в процесі експлуатації зуби зазнають зношування, що змінює умови їх взаємодії. Дослідження впливу зношування зубів на зміну радіусів кривини їх профілів у циліндричній евольвентній косозубій передачі проведено у [2 - 4]. Нижче подано результати досліджень дво – одно – двопарного зачеплення при висотному і кутовому коригуванні з урахуванням впливу зношування. Для розв'язку задачі використано метод оцінки зношування і довговічності зубчастих передач за наявності коригування зачеплення [1, 5, 6] та методику урахування зміни кривини зубів внаслідок зношування [2 - 4].

Для розрахунку прийнято такі дані:

$z_1 = 20$  – кількість зубів шестерні;

$b_w = 30$  мм – ширина шестерні;

$P = 5$  кВт - потужність;

$K_g = 1,6$  – коефіцієнт динамічності;

$m = 3$  мм – модуль зачеплення;

$u = 4$  – передавальне відношення передачі;

$n_1 = 700$  об/хв – частота обертання ведучого валу;

$\beta = 0^\circ, 10^\circ, 12^\circ$  – кут нахилу зубів;

$\Delta\varphi = 4^\circ$  – кут повороту шестерні з точки початкового контакту зубів (т. 0) в точку 1 і т. д.;

$h_* = 0,5$  мм – допустиме зношування зубів; мащення – осьова олива з 3 % антизношувальної

присадки з кінематичною в'язкістю  $v_{+50^\circ} \approx 15$  сСт;

$f = 0,05$  – коефіцієнт тертя ковзання; досліджується дво - одно - двопарне зачеплення зубів.

Коефіцієнти зміщення та параметри передачі:

а) висотне зміщення:  $x_1 = -x_2 = 0; 0,2; 0,4; 0,6; x_\Sigma = 0; a_w = 150$  мм – міжосьова відстань у некоригованому зачепленні;

б) кутове зміщення:  $\beta = 0^\circ: x_1 = 0 \dots 1, x_2 = 0 \dots 1,4566; x_\Sigma = x_1 + x_2 = 1,4566$  – сумарний коефіцієнт зачеплення;  $a_w = 150$  мм;  $a_{wk} = 154$  мм – дійсна міжосьова відстань;  $\alpha_w = 23,754^\circ$  – коригований кут зачеплення;

$\beta = 10^\circ: x_1 = 0 \dots 0,5, x_2 = 0 \dots 0,584; x_\Sigma = 0,584; a_w = 152,314$  мм;  $a_{wk} = 154$  мм;  $\alpha_w = 21,918^\circ$ ;

$\beta = 12^\circ: x_1 = 0 \dots 0,2, x_2 = 0 \dots 0,2196; x_\Sigma = 0,2196; a_w = 153,351$  мм;  $a_{wk} = 154$  мм;  $\alpha_w = 21,049^\circ$ .

Матеріали коліс: шестерня – сталь 38ХМЮА, азотована;  $C_1 = 3,9 \cdot 10^6$ ,  $m_1 = 2$  – характеристики зносостійкості; колесо – сталь 40Х, об'ємне гартування, НВ 341;  $C_2 = 0,17 \cdot 10^6$ ,  $m_2 = 2,5$ ;  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль Юнга,  $\nu = 0,3$  – коефіцієнт Пуассона.

Результати розв'язку подано на рис. 1 - 5. Зокрема на рис. 1 при прийнятих кутах повороту шестерні зліва подано графіки зміни початкових максимальних тисків  $p_{j \max}$ , а справа трибоконтактних тисків  $p_{jh \max}$  після досягнення допустимого зношування в одній з точок профілю зубів колеса для випадку їх висотного коригування, а на рис. 2 – для кутового коригування. Тут  $j = 0, 1, 2, \dots$  точки співдотуку профілів зубів, що відповідають куту  $\Delta\varphi = 0, 4^\circ, 8^\circ, \dots$  повороту шестерні.

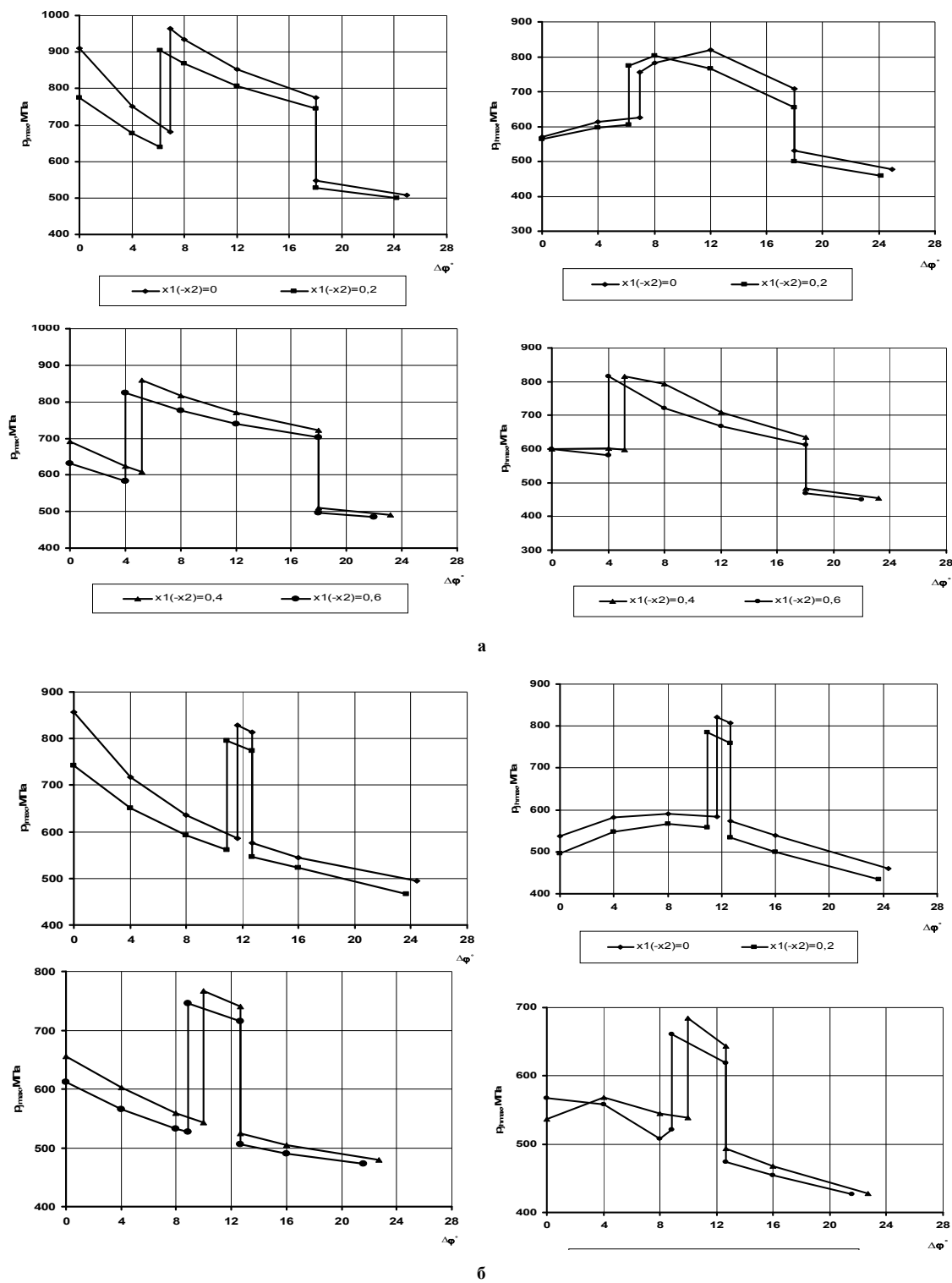


Рис. 1 – Вплив зношування при висотному коригуванні зачеплення на зміну максимальних контактних тисків при:

а –  $\beta = 0^\circ$ ;  
б –  $\beta = 10^\circ$

Зношування зубів значно знижує початкові тиски  $p_{j\max}$  у першій фазі двопарного зачеплення. Натомість у фазі однопарного зачеплення ця зміна є значно меншою, а у другій фазі двопарного зачеплення є, як правило, менш значимою. Величина зміни  $p_{j\max}$  залежить від коефіцієнтів коригування  $x_1 = -x_2$  зубів коліс.

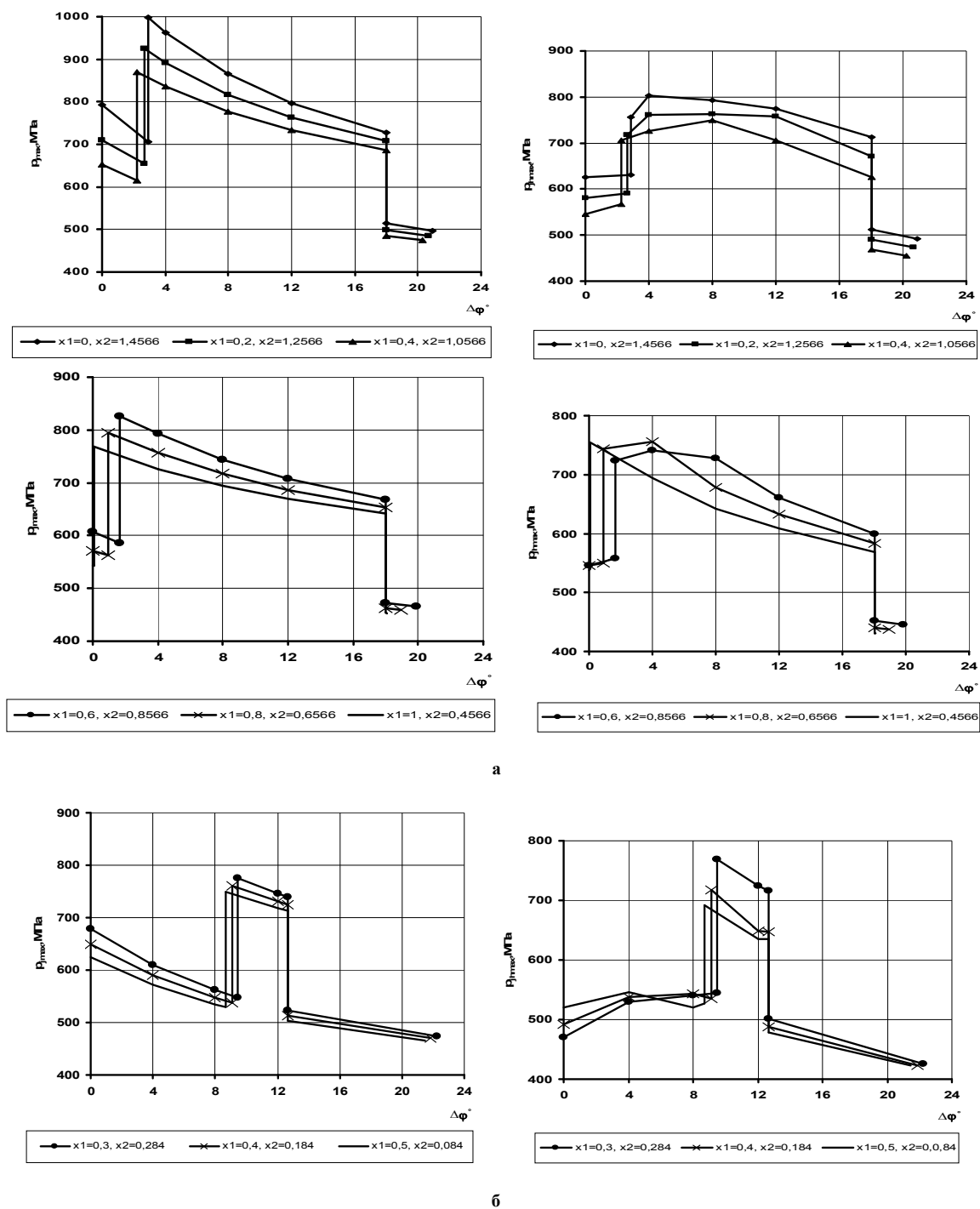
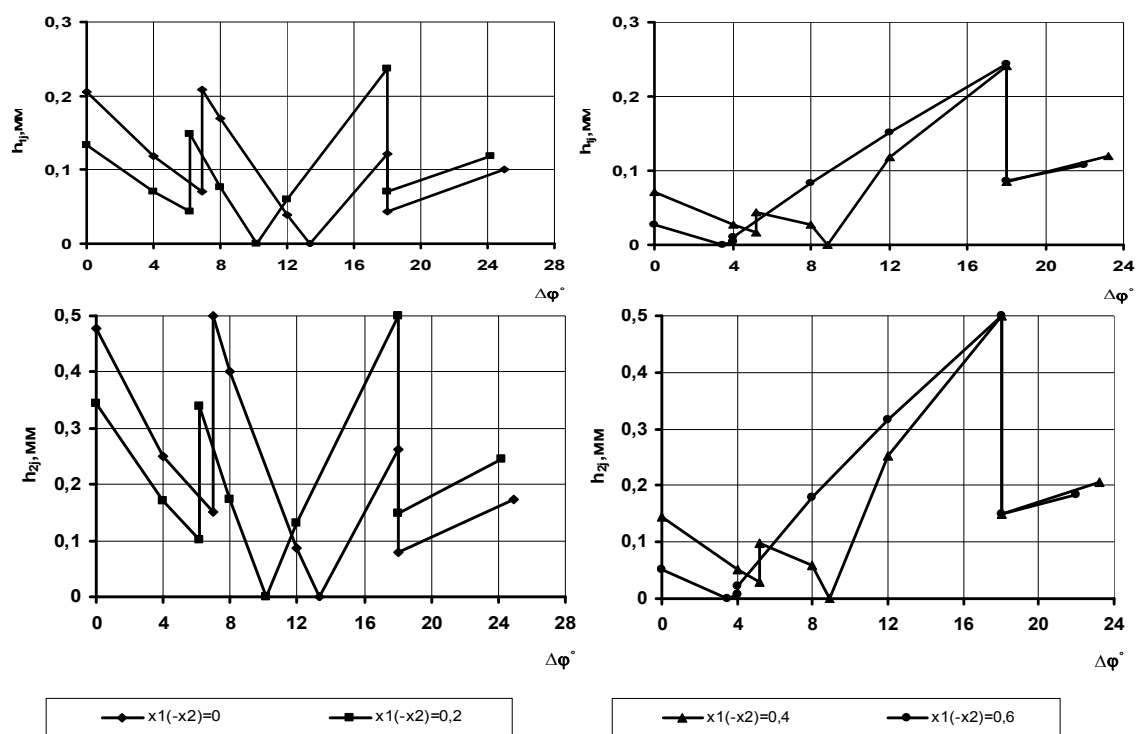


Рис. 2 – Вплив зношування при кутовому коригуванні зачеплення на зміну максимальних контактних тисків при  $\beta = 10^\circ$

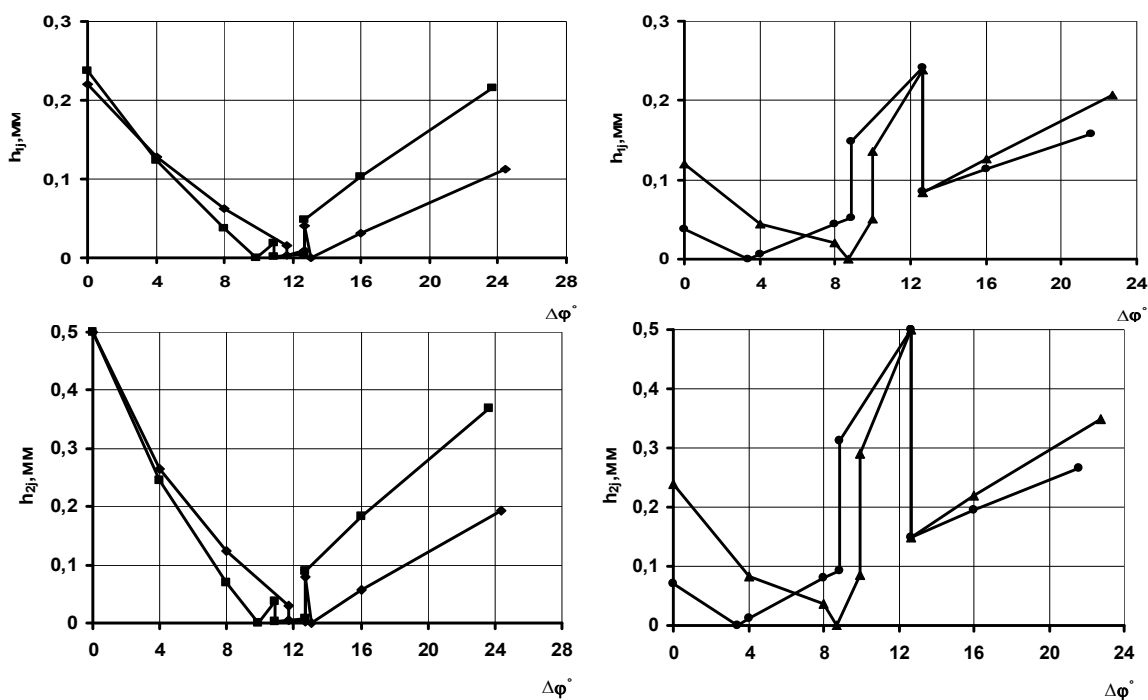
а –  $\beta = 0^\circ$ ;  
б –  $\beta = 10^\circ$

Аналіз рис. 2 свідчить, що при кутовому коригуванні із збільшенням коефіцієнта коригування  $x_1$  зубів шестерні і, відповідно, зменшенням коефіцієнта коригування  $x_2$  зубів колеса спостерігаються тенденції зміни  $p_{j\max}$ , подібні до висотного коригування.

Закономірності лінійного зношування зубів наведено на рис. 3, 4. Зокрема на рис. 3 при висотному коригуванні зачеплення, а на рис. 4 – при кутовому.



а



б

Рис. 3 – Вплив висотного коригування зачеплення на зношування зубів

а –  $\beta = 0^\circ$ ;

б –  $\beta = 10^\circ$

Характер зношування зубів залежить від величини коефіцієнтів коригування  $x_1 = -x_2$ . При  $x_1 = -x_2 = 0$  допустиме зношування зубів колеса і максимальне зношування зубів шестерні буде на вхо-

ді у однопарне зачеплення, а в подальшому при збільшенні коефіцієнтів коригування воно буде на їх виході із зачеплення. У косозубій передачі ці тенденції змінюються: спочатку допустиме зношування буде на вході у двопарне зачеплення, а потім при більших  $x_1 = -x_2$  – на виході з однопарного зачеплення. Зуби колеса зношуються приблизно вдвічі швидше, ніж зуби шестерні.

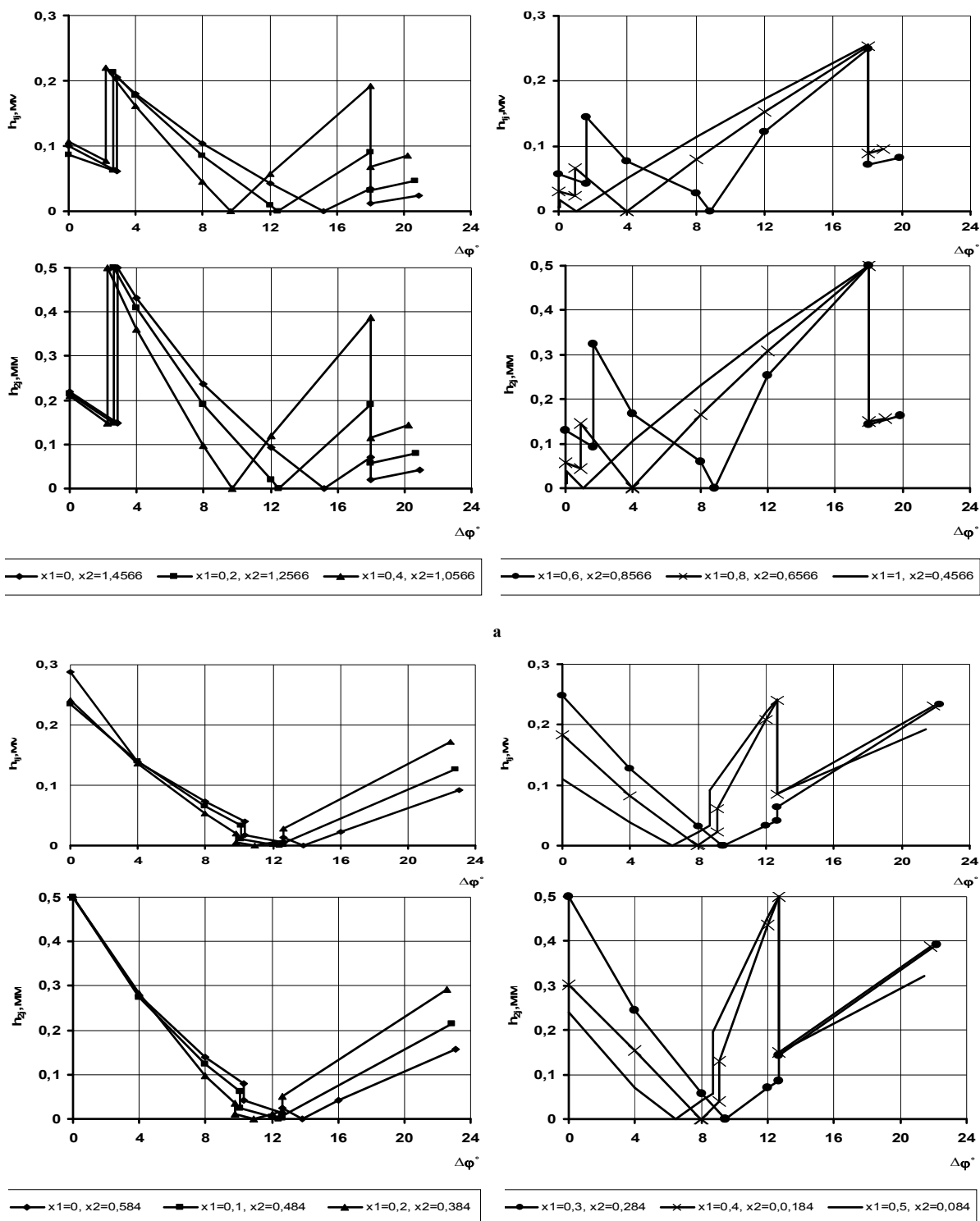


Рис. 4 – Вплив кутового коригування зачеплення на зношування зубів

а –  $\beta = 0^\circ$ ;  
б –  $\beta = 10^\circ$

Закономірності зношування зубів при цьому виді коригуванні є подібними, як при висотному коригуванні. Для певного діапазону значень  $x_1, x_2$  при  $\beta = 0^\circ$  допустиме зношування зубів колеса та максимальне зношування зубів шестерні буде на вході в однопарне зачеплення, а в подальшому – на виході з нього. При  $\beta > 0$  тенденція щодо максимального зношування є подібною до вищевказаної.

На рис. 5 подано довговічність  $t_{\min}$  передачі при  $\rho_j = \text{const}$  та  $\rho_j = \text{var}$  (внаслідок зношування зубів), де  $\rho_j$  – радіуси кривини профілів зубів у точках  $j$ .

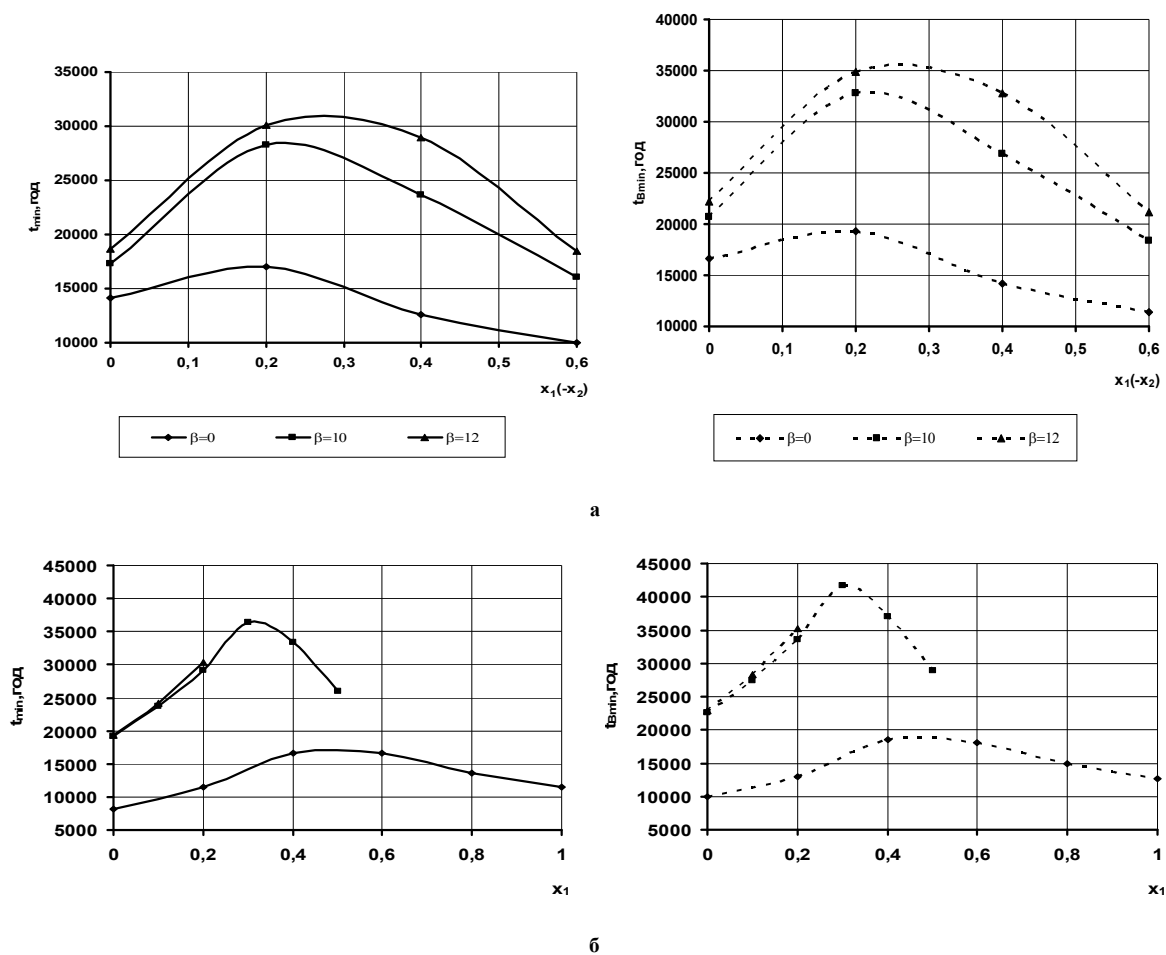


Рис. 5 – Вплив збільшення радіуса кривини зубів на довговічність передачі:  
суцільна лінія –  $t_{\min}$  при  $\rho_j = \text{const}$ , штрихова лінія –  $t_{B\min}$  при  $\rho_j = \text{var}$   
а – висотне коригування;  
б – кутове коригування

Дійсна довговічність передачі при врахуванні зростання радіусів кривини профілів зубів буде в 1,1 ... 1,21 рази більшою, ніж за постійних умов взаємодії зубів. Для некоригованого зачеплення відмінність довговічностей є найбільшою. Найвища довговічність досягається при певних значеннях коефіцієнтів коригування  $x_1, x_2$  зачеплення у залежності від кута нахилу зубів. У косозубій передачі особливо за наявності коригування зачеплення довговічність є значно вищою, ніж у прямозубій.

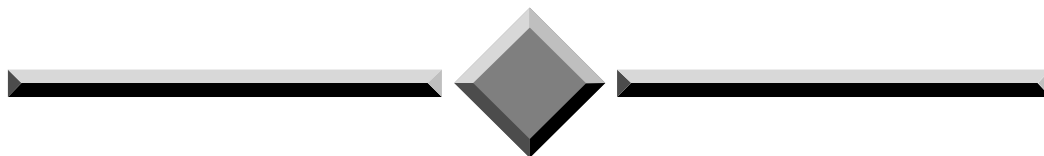
Проведені у чотирьох частинах цієї статті дослідження впливу умов зачеплення зубів (парності зачеплення) на максимальні контактні тиски, зношування зубів і довговічність циліндричної передачі з некоригованим і коригованим зачепленням, без врахування впливу зношування на параметри контакту та з його врахуванням свідчать про суттєвість цього впливу на вказані характеристики контактної і трибоконтактної взаємодії. Тому використання в інженерній практиці модифікованого методу розрахунку зношування і довговічності зубчастих передач, що містить розроблений спосіб визначення фаз двопарного і однопарного зачеплення зубів, є доцільним і обґрунтованим, оскільки дозволяє більш об'єктивно провести прогнозу оцінку цих важливих триботехнічних характеристик.

---

**Література**

1. Чернець М.В., Чернець Ю.М. Дослідження умов зачеплення зубів циліндричної евольвентної передачі на контактну міцність, зношування і довговічність. Част. 2. Постійні умови взаємодії у коригованому зачепленні // Проблеми трибології. – 2014. – № 4. – С. 6 - 16.
2. Чернець М.В., Чернець Ю.М. Дослідження умов зачеплення зубів циліндричної евольвентної передачі на контактну міцність, зношування і довговічність. Част. 3. Змінні умови взаємодії у некоригованому зачепленні // Проблеми трибології. – 2014. – № 4. – С. 49 - 54.
3. Чернець М.В., Келбінські Ю., Ярема Р.Я. Узагальнений метод оцінки зношування циліндричних евольвентних зубчастих передач // ФХММ. – 2011. – № 1. – С. 44 - 49.
4. Чернець М.В., Ярема Р.Я., Чернець Ю.М. Метод оцінки впливу коригування і зношування зубів евольвентної циліндричної передачі на довговічність та міцність. Ч.1. Довговічність та зношування // ФХММ. – 2012. - № 3. – С. 30-39.
5. Оцінка довговічності, зношування та контактної міцності зубчастих передач / Під заг. ред. М.В.Чернеця. – Дрогобич: Вимір. – 2002. – 128 с.
6. Чернець М., Ярема Р. До питання про вплив коригування зачеплення циліндричної косозубої передачі на її довговічність // машинознавство. – 2011. – № 10. – С. 15 - 20.

Поступила в редакцію 23.02.2015



**Проблеми трибології**  
**“Problems of Tribology”**  
**E-mail: [tribosensor@gmail.com](mailto:tribosensor@gmail.com)**

**Chernets M.V., Chernets Ju. M. Investigation of teeth engagement conditions of cylindrical involute gear on contact strength, wear and durability. Part 4. Changeable interaction conditions in correlated engagement.**

According to calculation method of tooth gears' wear and durability it has been conducted an investigation of influence of double – single – double - tooth engagement on maximal contact pressures, teeth wear and gear durability at altitude and angular correlation at changeable conditions of their contact in the result of teeth wear. It has been established the regularities of tribocontact pressures change in engagement after achievement of permissible wear depending on the values of shift coefficients and type of correlation. It has been observed the significant decrease of maximal tribicontact pressures in the input phase of double-tooth engagement. Actual gear durability after taking into account the increase of teeth contours curvature radii is 1,1 ... 1,2 times higher than according to simplified method which involves constant teeth interaction conditions.

**Key words:** cylindrical involute tooth gear, double – single – double - tooth engagement, engagement correlation, teeth curvature change in the result of wear, contact pressure, tooth wear, gear durability.

**References**

1. Chernec M.V., Chernec Yu.M. Doslidzhennia umov zacheplennia zubiv cylindrycznoi evolventnoi peredaczi na kontaktnu micnist, znoszuвання i dovhovicznist. Czast. 2. Postijni umovy vzaiemodiji u koryhovanomu zacheplenni. Problemy trybologii, № 4, 2014. S. 6-16.
2. Chernec M.V., Chernec Yu.M. Doslidzhennia umov zacheplennia zubiv cylindrycznoi evolventnoi peredaczi na kontaktnu micnist, znoszuвання i dovhovicznist. Czast. 3. Zminni umovy vzaiemodiji u nekoryhovanomu zacheplenni. Problemy trybologii, № 4, 2014. S. 49-54.
3. Chernec M.V., Yarema R.Ya. Uzahalnenyj metod ocinky vplyvu koryhuvannja zubiv na resurs, znoszuвання ta kontaktnu micnist cylindrycznyh evolventnyh peredacz. FKHM, №4, 2011. S. 115 - 121.
4. Chernec M.V., Yarema R.Ya., Chernec Yu.M. Metod intehrujuczoi ocinky zubiv evolventnoi cylindrycznoi peredaczi na dovhovicznist i kontaktnu micnist. Czast.1. Dohovicznist i znoszuвання. FKHM, №3, 2012. S. 30 – 39.
5. Ocinka dovhovicznosti, znoszuвання ta kontaktnoi micnosti zubczastyh peredacz. Pid zah. red. M.V.Chernecja. Drohobycz: Vymir. 2002. 128 s.
6. Chernec M., Yarema R. Do pytannja pro vplyv koryhuvannja zacheplennja cylindrycznoi kosozuboi peredaczi na jii dovhovicznist. Mashynoznavstvo, №10, 2011. S. 15 - 20.