

Luzan S.

STRUCTURE CONCEPT OF THE RECONSTRUCTION REPAIR GASOTHERMAL
EVAPORATION COATING

The designed structure to concepts of the reconstruction repair gasothermal evaporation coatings. The determination groups factor, defining choice to technologies, which is integrated with gasoflame evaporation for increasing quality coating.

УДК 621.833.031

*Приймаков О.Г., канд. техн. наук; Градиський Ю.О., канд. техн. наук;
Янчик О.Г., канд. техн. наук*

**ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІРИ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ
ЗНОСОКОНТАКТНИХ ПАР ТЕРТЯ НА БАЗІ ТЕОРІЇ ДВОВИМІРНИХ
МАРКОВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ**

Загальна постановка проблеми і її зв'язок з науково-практичними завданнями. Зносоконтактна взаємодія пар тертя в машинобудуванні є визначальною для прогнозування їх витривалості, особливо з врахуванням технологічних і експлуатаційних параметрів. Це явище відоме в машинобудуванні під назвою витривалості в процесі експлуатації, а надійність є об'єктивним параметром цієї витривалості.

Для витривалості машинобудівних конструкцій, у яких мають місце випадкове навантаження і поступові відмови різної фізичної природи, можна використовувати кінетичні рівняння для міри пошкодження і рівняння фільтра для визначального параметра щільності ймовірності відмов у зв'язку з утратою витривалості.

Огляд публікацій і аналіз невирішених проблем. Як відомо [1-4], міру пошкоженості та інтенсивності зношування зносоконтактної пари тертя довільного трибо сполучення в машинобудуванні доцільно моделювати та прогнозувати з допомогою теорії двовимірних марковських процесів (ланцюгів) [5-8].

Автори [9] вдосконалили цей метод, пристосували його до задач прогнозування зносоконтактної витривалості трибосполучень як на стадії проектування, так і в процесі їх експлуатації.

Метою роботи є створення методики прогнозування зносостійкості пар тертя з урахуванням технологічних та експлуатаційних параметрів на базі теорії двовимірних марковських процесів.

Результати досліджень і їх аналіз. Для перевірки точності методів, що базуються на теорії двовимірних марковських процесів, були проведені чисельні дослідження для лінійної моделі накопичення пошкоджень

$$\lim \theta(\lambda, \omega, t) = P_S(\lambda)\theta(\omega, t), \quad t \rightarrow 0 \quad (1)$$

і порівняння з результатами, отриманими за методом статистичного моделювання, і асимптотичним методом [10]. Розраховувалася щільність імовірності міри втомних пошкоджень у два різні моменти часу t_i за таких вихідних даних, що є усередненими для середнього машинобудування:

- частота процесу $\omega = 200 \pi$ і відповідний період $T = \frac{2\pi}{\omega} = 0,01$ с;
- число модельованих амплітуд (циклів) N для $t_1 = 5$ с дорівняло 500, для $t_2 = 10$ с – 1000;

- базове число циклів $N_0 = 10^7$, показник кривої втоми $r = 4$;
- математичне сподівання десятичного логарифму межі витривалості $m_{\lg \sigma_{-1}} = 2,6989$;
- середньоквадратичне відхилення десятичного логарифма межі витривалості $\sigma_{\lg \sigma_{-1}} = 0,0$ (відповідає детермінованій кривій втоми); 0,05; 0,1;
- параметр релеївського розподілу $\sigma_\lambda^2 = 10^6$ (МПа)².

Результати статистичного моделювання отримані для 400 значень межі витривалості σ_{-1} і представлені на рис. 1 – 6 у вигляді гістограм для $N_j = 400$ значень міри пошкоджень. Гістограма 1 відповідає методу статистичного моделювання без урахування взаємного впливу значень амплітуд $\lambda(t)$ у різні моменти часу t_{i-1} і t_i , а гістограма 2 – з урахуванням зазначеного впливу.

На рис. 1 – 3 представлені щільності імовірності міри пошкоджень, отримані з використанням теорії двовимірних марковських процесів і асимптотичного методу для $t_1 = 5$ с і відповідно $\sigma_R = \sigma_{\lg \sigma_{-1}} = 0,0; 0,05; 0,1$.

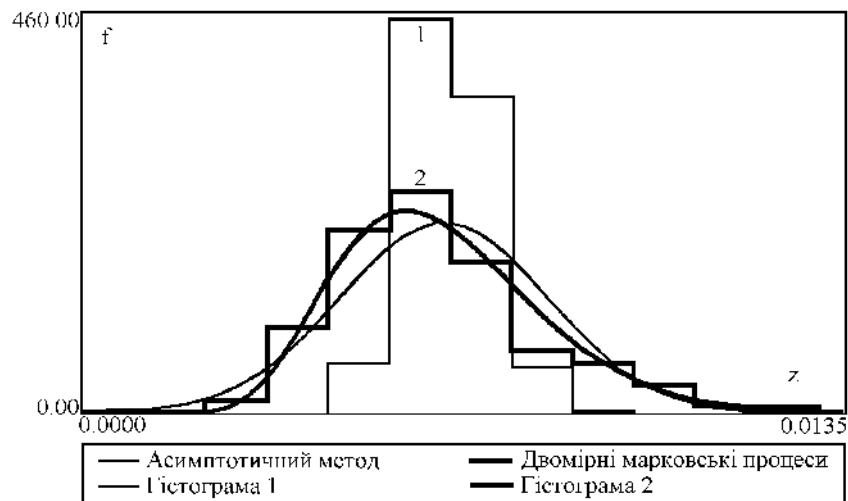


Рис. 1. Результати статистичного моделювання для лінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 5$ с і $\sigma_R = 0$

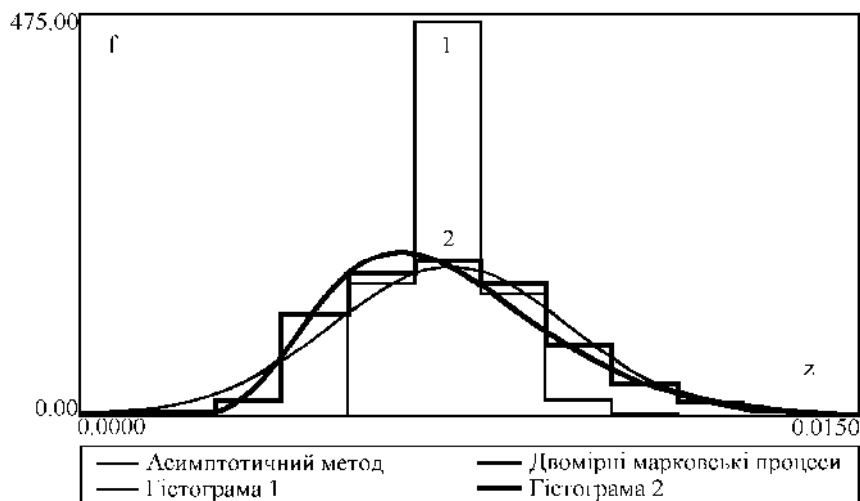


Рис. 2. Результати статистичного моделювання для лінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 5$ с і $\sigma_R = 0,05$

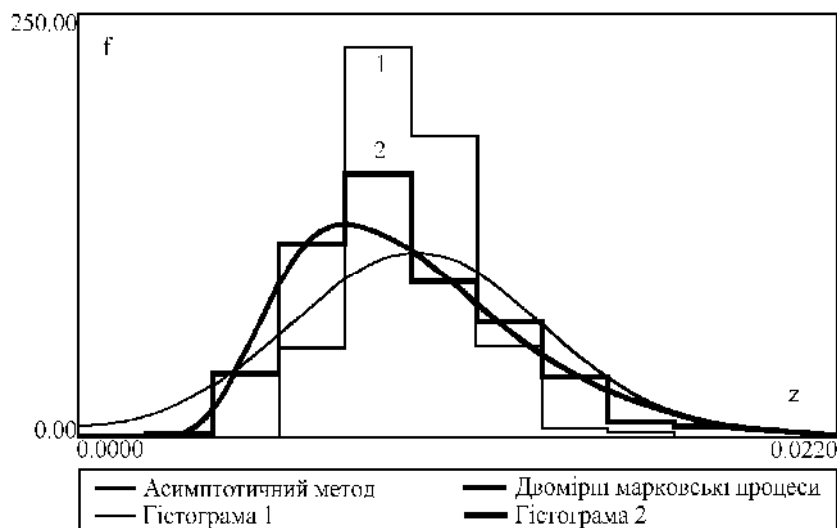


Рис. 3. Результати статистичного моделювання для лінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 5$ с і $\sigma_R = 0,1$

На рис. 4 – 6 представлені щільності ймовірності міри пошкоджень, отримані з використанням теорії двовимірних марковських процесів і асимптотичного методу для $t_2 = 10$ с і відповідно $\sigma_R = \sigma_{\lg \sigma_{-1}} = 0,0; 0,05; 0,1$.

Розв'язок, отриманий за асимптотичним методом, дає нормальний закон для щільності ймовірності міри пошкоджень. Ступінь збігу емпіричного і теоретичного розподілу визначаємо за критерієм згоди Пірсона χ^2 [11].

У таблиці 1 представлені значення статистики χ_0^2 і відповідні їм P - значення ($P_{\text{Д.М.П}}$ і $P_{\text{А.М.}}$ – за порівняння гістограми 2 з розв'язком на основі двовимірних марковських процесів і нормальним законом) для різного числа інтервалів розбиття $m = 14$ і $m = 16$. Зазначена таблиця отримана для розв'язків, представлених на рис. 2, 5.

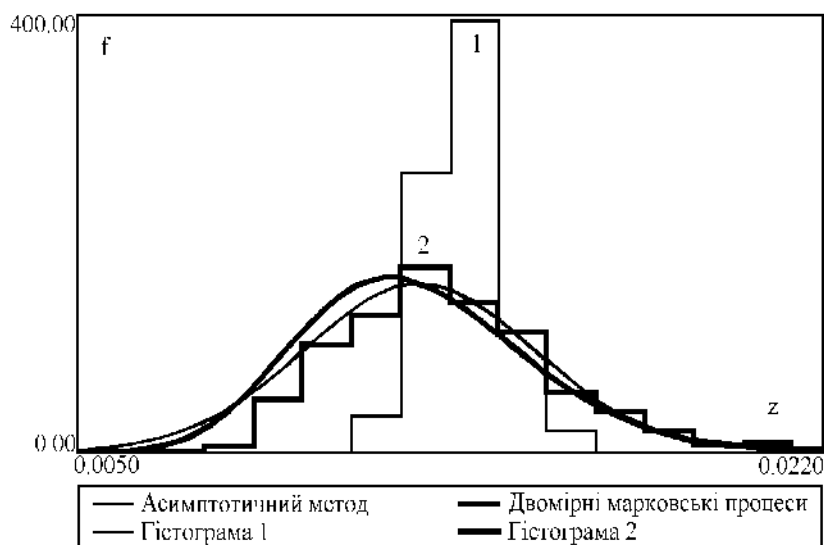


Рис.4. Результати статистичного моделювання для лінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 10$ с і $\sigma_R = 0$

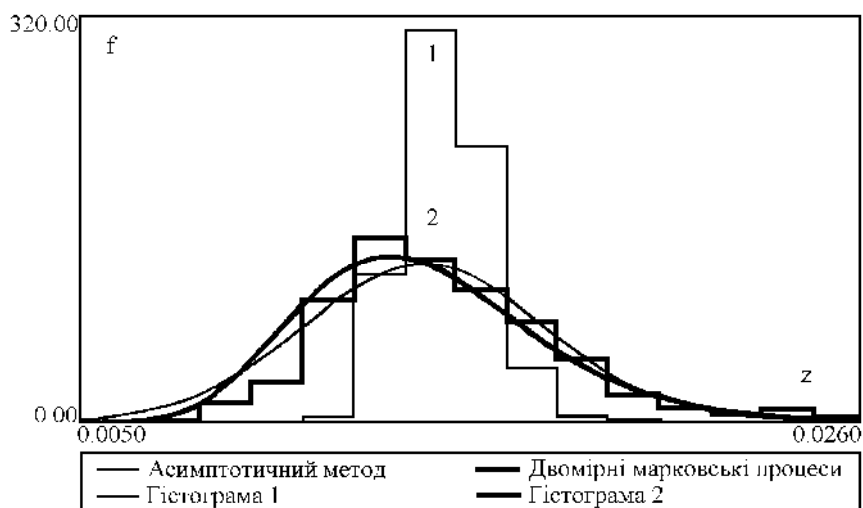


Рис. 5. Результати статистичного моделювання для лінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 10$ с і $\sigma_R = 0,05$

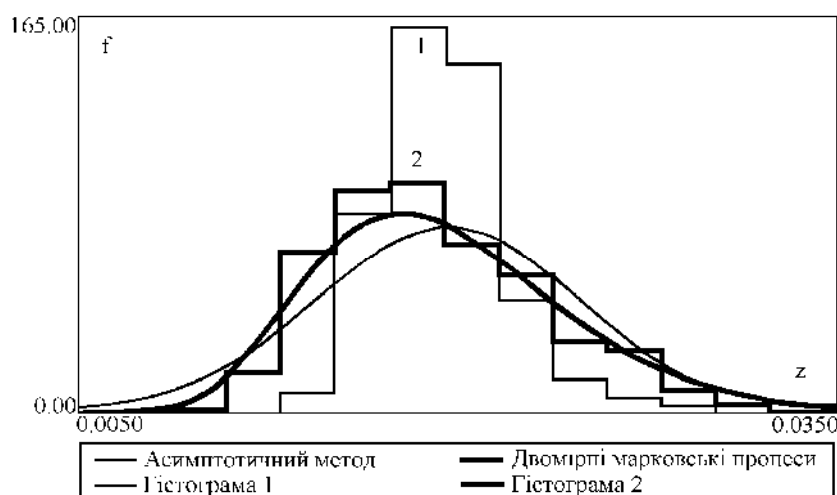


Рис. 6. Результати статистичного моделювання для лінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 10$ с і $\sigma_R = 0,1$

Таблиця 1

m	$t_1 = 5$ с, $\sigma_{\lg \sigma_{-1}} = 0,05$				$t_2 = 10$ с, $\sigma_{\lg \sigma_{-1}} = 0,05$			
	χ_0^2	$P_{\text{Д.М.П}}$	χ_0^2	$P_{\text{А.М.}}$	χ_0^2	$P_{\text{Д.М.П}}$	χ_0^2	$P_{\text{А.М.}}$
14	4,485	0,963	13,042	0,291	5,044	0,929	19,747	0,049
16	5,272	0,968	11,771	0,546	2,773	0,998	13,397	0,418

З аналізу отриманих результатів видно, що відповідність між гистограмою 2 і розв'язком значно краща за використання двовимірних марковських процесів в порівнянні з асимптотичним методом. Якісно такі ж результати отримані і під час аналізу результатів, представлених на рис. 1, 3, 4, 6. Гістограма 1, як видно з рисунків, навіть якісно не відповідає аналізованим розв'язкам, що дозволило для неї не проводити подальші дослідження з використанням критерію згоди Пірсона χ^2 . На жаль, величина статистики χ_0^2 істотно залежить від обсягу вибірки і в разі досягнення деякого рівня

збігу між досліджуваною гістограмою і передбачуваною щільністю ймовірності подальше збільшення вибірки веде до збільшення χ_0^2 і, отже, зменшення P -значення.

У статті розглянута також статистика s^2

$$s^2 = \sum_{i=1}^m (\bar{p}_i - p_i^{(0)})^2, \quad (2)$$

що прагне до нуля за збігу емпіричного і теоретичного розподілів і має властивість збільшуватися за збільшення обсягу вибірки. У виразі (2) $\bar{p}_i = \frac{r_i}{N_j}$ – оцінці максимальної ймовірності для експериментальних значень частот r_i , ($r_1 + r_2 + \dots + r_m = N_j$), $p_i^{(0)}$ – відомі величини для конкретних щільностей імовірності, $\sum_{i=1}^m p_i^{(0)} = 1$.

У таблиці 2 представлені значення статистики s^2 за порівняння гістограми 2 з розв'язками, отриманими з використанням двовимірних марковських процесів ($s_{Д.М.П.}^2$) і асимптотичного методу ($s_{А.М.}^2$), для різного числа інтервалів розбивки і різного обсягу вибірки N_j . Зазначена таблиця отримана під час аналізу розв'язків, представлених на рис. 2.

Таблиця 2

m	$N_j = 100$		$N_j = 200$		$N_j = 300$		$N_j = 400$	
	$s_{Д.М.П.}^2 \times 10$	$s_{А.М.}^2 \times 100$	$s_{Д.М.П.}^2 \times 10$	$s_{А.М.}^2 \times 100$	$s_{Д.М.П.}^2 \times 10$	$s_{А.М.}^2 \times 100$	$s_{Д.М.П.}^2 \times 10$	$s_{А.М.}^2 \times 100$
7	0,741	2,884	0,338	0,681	0,396	0,536	0,195	0,847
8	0,814	1,746	0,248	0,226	0,325	0,398	0,224	0,643
9	1,302	1,191	0,125	0,535	0,246	0,394	0,177	0,647
10	1,021	1,993	0,256	0,411	0,355	0,239	0,229	0,442
11	0,731	2,244	0,094	0,586	0,208	0,548	0,188	0,904
12	0,594	1,224	0,319	0,105	0,398	0,339	0,220	0,457
13	0,324	0,948	0,332	0,232	0,458	0,218	0,237	0,384
14	1,108	2,332	0,251	0,566	0,35	0,488	0,197	0,582
15	0,766	1,587	0,253	0,255	0,34	0,267	0,197	0,387
16	0,526	1,392	0,225	0,413	0,256	0,259	0,169	0,384
17	0,483	1,081	0,303	0,276	0,301	0,243	0,165	0,381
18	0,921	1,645	0,229	0,418	0,277	0,348	0,168	0,445
19	1,031	1,900	0,219	0,327	0,315	0,339	0,209	0,459

З аналізу отриманих результатів видно що відповідність між гістограмою 2, отриманою з використанням методу статистичного моделювання з урахуванням взаємного впливу значень амплітуд $\lambda(t)$ в різні моменти часу t_{i-1} і t_i , і розв'язком значно краща в разі використання двовимірних марковських процесів порівняно з асимптотичним методом. Аналогічні результати отримані і під час аналізу результатів, представлених на рис. 1, 3, 4, 5, 6.

Були також проведені чисельні дослідження для нелінійної моделі накопичення пошкоджень, і порівняння з результатами, отриманими за методом статистичного моделювання і асимптотичним методом [10, 11]. Розраховувалася щільність імовірності міри втомних пошкоджень у два різні моменти часу t_i за таких вихідних даних (рис. 7, 8):

- частота процесу $\omega = 200 \pi$ і період $T = \frac{2\pi}{\omega} = 0,01$ с;
- число модельованих амплітуд (циклів) N для $t_1 = 1$ с дорівнювало 100, для $t_2 = 2$ с – 200;
- базове число циклів $N_0 = 10^7$, показник кривої втоми $r = 4$;
- математичне сподівання десятичного логарифма межі витривалості $m_{\lg \sigma_{-1}} = 2,6989$;
- середньоквадратичне відхилення десятичного логарифму межі витривалості $\sigma_{\lg \sigma_{-1}} = 0,1$;
- параметр релеївського розподілу $\sigma_\lambda^2 = 10^8$ (МПа)²;
- початкова пошкоджуваність $z_0 = 0,05$.

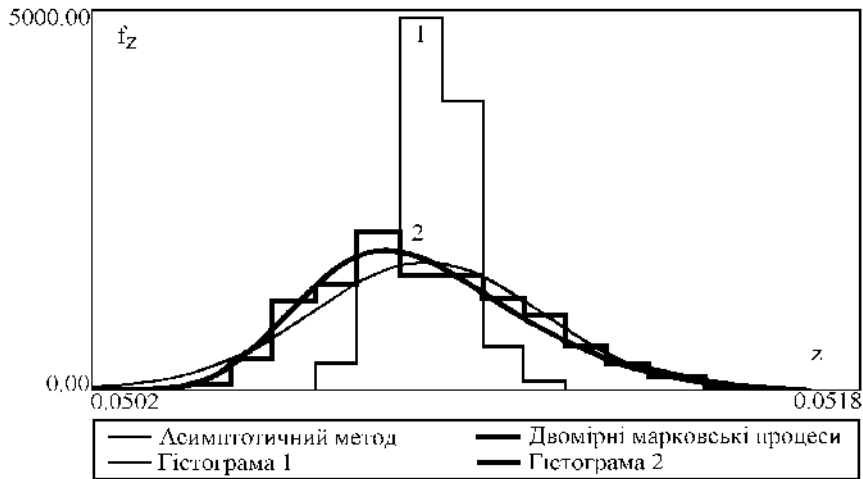


Рис. 7. Результати статистичного моделювання для нелінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 1$ с, $\sigma_R = 0,1$, $z_0 = 0,05$, $N_0 = 10^7$

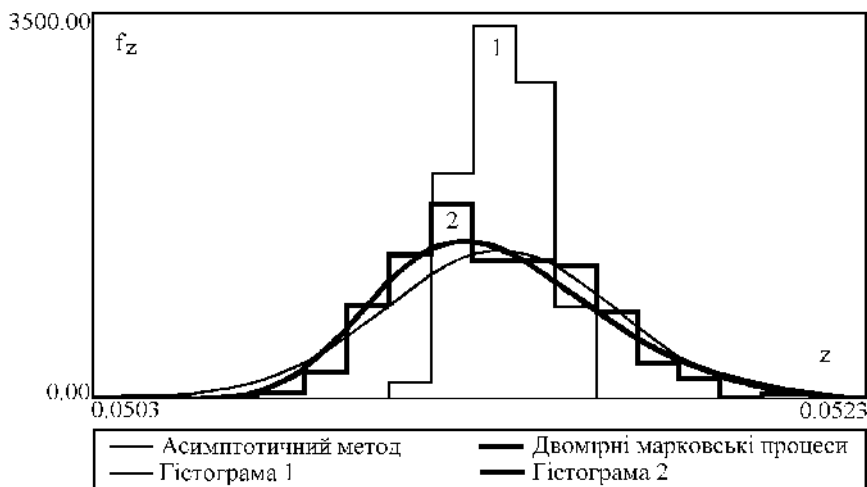


Рис. 8. Результати статистичного моделювання для нелінійної моделі накопичення пошкоджень для $t_1 = 2$ с, $\sigma_R = 0,1$, $z_0 = 0,05$, $N_0 = 10^7$

Висновки та перспективи подальших розробок в даному напрямку:

- створена методика прогнозування зносостійкості пар тертя з урахуванням технологічних і експлуатаційних параметрів;
- зазначена методика відмінно корелюється марковськими моделями з багатомірним обчисленням;
- зазначений напрямок досліджень є перспективним, тому що дозволяє аналітично розв'язувати важливу народногосподарську науково-технічну проблему щодо підвищення ресурсу, забезпечення високої надійності вітчизняних машин та механізмів.

Найближчим часом автори мають на меті алгоритмізувати зазначений метод розрахунку та створити експрес-методику розрахунку надійності, ресурсу та інших критеріїв працездатності зносостійких пар тертя в середньому машинобудуванні.

Література: 1. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Высш. школа, 1985. - 271 с. 2. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. - М.: Стройиздат, 1968. - 592 с. 3. Браунли К. Статистическая теория и методология в науке и технике. - М.: Наука, 1977. - 408 с. 4. Приймаков О.Г. Модель фрикційної втоми при абразивному зношуванні. - Проблеми трибології / Міжнародн. наук. журнал. - 2005. - №1. - С. 136 – 154. 5. Адлер Б.П., Маркова Е.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1977. - 279 с. 6. Васильев В.И., Иванюк А.И. Моделирование систем в гражданской авиации. В 2-х ч. - М.: Транспорт, 1977. - 362 с. 7. Приймаков О.Г., Бабак В.П., Стадніченко В.М. Надійність, довговічність та технічна експлуатація літальних апаратів. - К.: вид. НАУ, 2006. - 387 с. 8. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Експериментальне дослідження інтенсивності зношування та пов'язаного з ним напружено-деформованого стану визначальних пар тертя в середньому машинобудуванні. - Вестник науки и техники, 2006. - Вып. 1-2 (24-25). - С. 17 – 28. 9. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та її застосування в машинобудуванні. - Харків: Oberig, 2009. - 336 с. 10. Жовдак В.А., Мищенко И.В. Прогнозирование надежности конструкций с учетом технологических и эксплуатационных факторов. - Х.: ХГПУ, 1999. - 119 с. 11. Приймаков О.Г., Стадніченко В.М. Надійність та технічна експлуатація елементів авіаційних конструкцій. К.: вид. НАУ, 2005. - 381 с.

Bibliography (transliterated): 1. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. - M.: Vyssh. shkola, 1985. - 271 s. 2. Bolotin V.V. Statisticheskie metody v stroitel'noj mehanike. - M.: Strojizdat, 1968. - 592 s. 3. Braunli K. Statisticheskaja teorija i metodologija v nauke i tehnikе. - M.: Nauka, 1977. - 408 s. 4. Prijmakov O.G. Model' frikcijnoj vtomi pri abrazivnomu znoshuvanni. - Problemi tribologii / Mizhнародn. nauk. zhurnal. - 2005. - №1. - S. 136 – 154. 5. Adler B.P., Markova E.V. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij. - M.: Nauka, 1977. - 279 s. 6. Vasil'ev V.I., Ivanjuk A.I. Modelirovanie sistem v grazhdanskoj aviacii. V 2-h ch. - M.: Transport, 1977. - 362 s. 7. Prijmakov O.G., Babak V.P., Stadnichenko V.M. Nadijnist', dovgovich-nist' ta tehnična ekspluatacija lital'nih aparativ. - K.: vid. NAU, 2006. - 387 s. 8. Prijmakov O.G., Gradis'kij Ju.O. Eksperimental'ne doslidzhennja intensivnosti znoshuvannja ta pov'jazanogo z nim napruzhenno-deformovanogo stanu viznachal'nih par tertja v seredn'omu mashinobuduvanni. - Vestnik nauki i tehniki, 2006. - Vyp. 1-2 (24-25). - S. 17 – 28. 9. Prijmakov O.G., Gradis'kij Ju.O. Teorija znosostijkoї vitrivalosti ta її za-stosuvannja v mashinobuduvanni. - Harkiv: Oberig, 2009. - 336 s. 10. Zhovdak V.A., Mi-wenko I.V. Prognozirovanie nadezhnosti konstrukcij s uchetom tehnologicheskikh i jekspluatacionnyh faktorov. - H.: HGPU, 1999. - 119 s. 11. Prijmakov O.G., Stadnichenko V.M. Nadijnist' ta tehnična ekspluatacija elementiv aviacijnih konstrukcij. K.: vid. NAU, 2005. - 381 s.

Приймаков А.Г., Градыский Ю.А., Янчик А.Г.

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕРЫ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ИЗНОСОКОНТАКТНЫХ ПАР ТРЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕОРИИ ДВУХМЕРНЫХ
МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ**

На основании теории двухмерных марковских процессов проведены численные исследования меры усталостных повреждений износоконтактных пар трения в среднем машиностроении. Численные исследования проведены для линейной и нелинейной моделей накопления повреждений с использованием некоторых усредненных исходных данных.

Primakov A.G., Gradyskiy Y.A., Janchik A.G.

**NUMERICAL RESEARCHES OF A MEASURE OF FATIGUE DAMAGES OF CONTACT
PAIRS OF FRICTION ON THE BASIS OF THE THEORY TWO-DIMENSIONAL
MARKOVIAN PROCESSES**

Numerical researches of a measure of fatigue damages of contact pairs of friction in average mechanical engineering are conducted on the basis of the theory two-dimensional markovian processes. Numerical researches are spent for linear and nonlinear models of accumulation of damages using of some average initial data.
