

ЗАСОБИ ТРАНСПОРТУ. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС. ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЛОГІСТИКА

УДК 531.43:621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).50-64](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).50-64)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, докторант

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: AulinVV@gmail.com

Модель надійності деталей транспортних машин за процесами реалізації триботехнологій їх припрацювання і відновлення

Обґрунтована необхідність побудови фізичних та математичних моделей надійності з врахуванням випадкових процесів та кількості локальних областей при зношуванні та відновленні з використанням триботехнологій припрацювання та відновлення. Дана модель поверхневого шару деталі з k підшарів. Розглянуто поведінку системи "поверхневий шар" з точки зору надійності, як поведінку системи сукупностей взаємозалежних локальних областей контактів. Стохастична модель надійності деталі зведена до системи поверхневих шарів з випадковими локальними областями контактів спряжених деталей. Наведено граф станів псевдосистеми "поверхневий шар" при різних умовах. Отримано систему стохастичних диференціальних рівнянь для розгляду процесів деградації та відновлення псевдостанів та наведено часткові її розв'язки.

надійність, триботехнологія припрацювання, триботехнологія відновлення, фізична модель надійності, поверхневий шар, транспортні машини

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, докторант

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Модель надежности деталей транспортных машин за процессами реализации триботехнологий их приработки и восстановления

Обоснована необходимость построения физических и математических моделей надежности с учетом случайных процессов и количества локальных областей при износе и восстановлении с использованием триботехнологий приработки и восстановления. Данная модель поверхностного слоя детали из k подслоев. Рассмотрены поведение системы "поверхностный слой" с точки зрения надежности, как поведение системы совокупностей взаимосвязанных локальных областей контактов. Стохастическая модель надежности детали сведена к системе поверхностных слоев со случайными локальными областями контактов сопряженных деталей. Приведен граф состояний псевдосистемы "поверхностный слой" при различных условиях. Получена система стохастических дифференциальных уравнений для рассмотрения процессов деградации и восстановления псевдосостояний и приведены частичные ее решения.

надежность, триботехнологии приработки, триботехнологии восстановления, физическая модель надежности, поверхностный слой, транспортные машины

Постановка проблеми. Результати досліджень надійності систем і агрегатів транспортних машин в цілому за закономірностями тертя, зношування і відновлення деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення [1-3] свідчать, що зміни, які спостерігаються в їх поверхневих шарах, являються стохастичними. При

цьому процесі тертя зношування та відновлення, що протікають в локальних областях контактів, мають випадкову природу [4-6]. Зазначене вимагає при побудові фізичних та математичних моделей надійності враховувати випадкові варіації зазначених процесів та кількість локальних областей на робочих поверхнях деталей. Для побудови стохастичної фізичної моделі надійності спряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин необхідно використати теоретичні обґрунтування процесів тертя, зношування та відновлення при використанні конкретних триботехнологій припрацювання (ТТП) та відновлення (ТТВ) [7-9], математичний апарат [10-12] та фізичні основи теорії надійності [13-16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Самоорганізовані процеси тертя дозволяють розробити методи, способи і засоби відновлення зношених робочих поверхонь спряжень деталей дизелів транспортних машин, в тому числі без їх розбирання, тобто технологій триботехнічного припрацювання і відновлення [2, 16-19]. Ця сторона процесів тертя в зазначених триботехнологіях остаточно не обґрунтована [20-24], проведено достатній обсяг експериментальних досліджень, але остаточно не створена трибофізична теорія протікаючих процесів керування ними, вплив їх на надійність спряжень деталей систем і агрегатів, і транспортних машин в цілому. Не з'ясовані також умови пристосування та регенерації поверхонь тертя [2, 23, 25-30], що потребує додаткових ретельних досліджень.

Серед зазначених питань на увагу заслуговують дослідження умов реалізації процесів самоорганізації [31-33] та саморегуляції процесів зношування [34-35], які дають новий імпульс розвитку практичних методів підвищення зносостійкості деталей і РО СГТ, змінюють погляди на механізм тертя і зношування. Експериментально доведено, що сервовітні плівки можуть утворюватися при використанні присадок, які містять не тільки мідь, але і інші матеріали. Для цього необхідно ввести компоненти присадки в мастильний матеріал або робоче (технологічне) середовище. Цей принцип покладено в основу розробки та застосування металоплакуючих присадок [25-27]. Доцільними в цьому напрямку є системно-спрямований підхід та синергетична концепція [2,3,14,16], які містять в собі загальні закономірності керування процесами і станами самоорганізації в ТТС різного роду. При цьому дослідження дисипації і синергізму при терті є перспективними в практичній реалізації, оскільки з'являється можливість розробки і застосування методів і засобів, що дозволяють в процесі експлуатації без розбирання вузлів і агрегатів, здійснювати відновлення й ефективно підвищувати зносостійкість ТТС. Це так звані інтелектуальні технології самовідновлення (smart-self technology), що входять в технології триботехнічного відновлення (ТТВ).

Регенерацію зношених деталей можна здійснювати ТТВ в різних робочих (технологічних) середовищах [19-24]. Застосування інтелектуальних технологій самовідновлення дозволяє знизити витрати на паливно-мастильні матеріали (ПММ) та запасні частини, скоротити тривалість усунення відмов, зменшити втрати в результаті простою техніки в період ремонту.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розроблення фізичної моделі надійності спряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення.

Виклад основного матеріалу. З фізичної точки зору усі процеси під час контактної взаємодії спряжень деталей, відбуваються в матеріалах їх поверхневих шарів [1,2,16,36,37]. Модельне уявлення поверхневого шару деталі, який підлягає процесам тертя, зношування та відновлення в трибоспряженнях деталей під час експлуатації систем і агрегатів транспортних машин представлено на рис. 1.

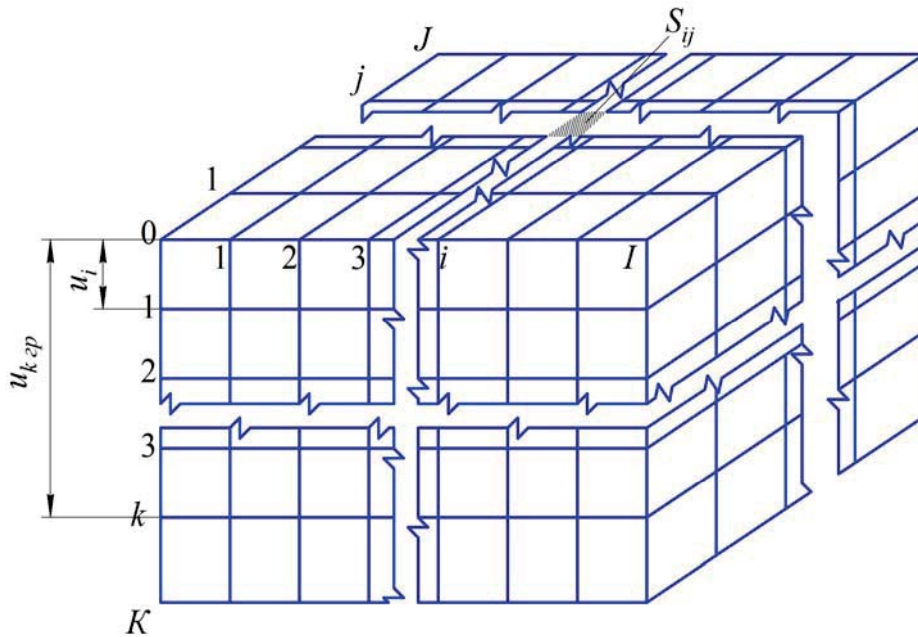


Рисунок 1 – Схема моделі поверхневого шару деталі, який складається з k підшарів, $k = \overline{0, K}$, що містять ij випадкових локальних областей: $i = \overline{0, I}$; $j = \overline{0, J}$

Джерело: розроблено авторами

Нехай поверхневий шар містить k підшарів. Початкова поверхня деталі $k = 0$, а в цілому поверхневий шар – $k = K$. При цьому знос шарів становить u_k , а граничний знос – $u_{k,sp}$. В процесі відновлення поверхні деталі за конкретною триботехнологією припрацювання та відновлення відповідно дорівнюють h_k і $h_{k,sp}$. Робочі поверхні після зношування являють собою сукупність локальних контактних областей S_{ij} , $i = \overline{0, I}$; $j = \overline{0, J}$, а їх загальна площа тертя дорівнює S_{ijl} , $l = \overline{0, L}$. Виходячи з цього початкова площа поверхні деталі S_{ij0} , а для критичного стану зносу S_{ijL} . Для площ локальних контактних областей вибирається з них початкова S_{00} , а потім поточні – $S_{ij}(S_{01}, S_{02}, \dots, S_{11}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{ij})$ і відповідно об'єм контактної області зношеного шару

дорівнює $V_{\omega jk} = S_{ijk} \cdot u_k$, k -шару – $V_{\omega k} = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J S_{ijk} \cdot u_k$, а загальний зношений об'єм

становить $V_{\omega} = \sum_{k=0}^K V_{\omega k}$. Для процесів відновлення відповідно маємо: $V_{rijk} = S_{ijk} \cdot h_k$,

$$V_{rk} = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J S_{ijk} \cdot h_k, \quad V_r = \sum_{k=0}^K V_{rk}.$$

Розгляд процесів зношування та відновлення деталі при застосуванні триботехнологій відновлення, передбачає ряд наступних припущень:

- всі локальні області контактів мають випадковий характер як по кількості, так і по площі;
- швидкості зношування та відновлення певного поверхневого шару є випадковими величинами, які знаходяться у визначеному інтервалі та є співрозмірними;

– інтенсивності зношування та відновлення локальної області контакту для даної поверхні деталі є постійними величинами, але мають інтервали вимірювання які змінюються випадковим чином в певних межах;

– деталь зношується на величину u_k , а відновлюється – на h_k , якщо всі локальні області шарів її поверхні зношуються на цю ж саму величину;

– знос ij -ої локальної області поверхневого шару деталі на величину u_k приводить до зміни інтенсивності зношування суміжних локальних областей;

– відновлення ij -ої локальної області поверхневого шару деталі на величину h_k приводить до зміни інтенсивності відновлення суміжних локальних областей.

Виходячи із фізичного уявлення про надійність зношеної і відновлюваної деталей, їх відповідність певним рівням показників еволюційної надійності, можна описати двома взаємозв'язаними моделями:

– модель системи "поверхневий шар";

– модель системи "деталь".

Поведінку системи "поверхневий шар", з точки зору надійності, розглядають як поведінку системи сукупностей взаємозалежних локальних областей контактів. При цьому локальні області контактів трибоспряжень деталей мають наступні властивості:

– одна з них є основною, а решта супутніми нерівнонадійними локальними областями, що знаходяться під навантаженням \vec{N} ;

– відмова системи "поверхневий шар" спостерігається при відмові усіх локальних областей ij , $i = \overline{0, I}$; $j = \overline{0, J}$, коли величини їх зношування набувають деякого граничного значення $u_{k_{cp}}$, характерного для даного матеріалу деталі і умов її функціонування;

– відновлення системи "поверхневий шар" спостерігається при відновленні усіх локальних областей ij , $i = \overline{0, i}$; $j = \overline{0, j}$, коли їх відновлення набуває деяких граничних значень $h_{k_{cp}}$, характерних для даної триботехнології;

– інтенсивність відмов системи "поверхневий шар" змінюється при виході з ладу будь-якої з локальних областей контактів;

– інтенсивність відновлення поверхневого шару змінюється при відновленні будь-яких з локальних областей контактів.

Поведінка системи "деталь" описується сукупною поведінкою поверхневих шарів як потоку, що переводить систему із стану в стан, і визначається ймовірністю переходу системи станів поверхневого шару при його зношуванні та відновлюванні [14-16]. Граф систем "поверхневий шар" і "деталь" для процесів зношування представлено на рис. 2, а для процесів відновлення на рис. 3.

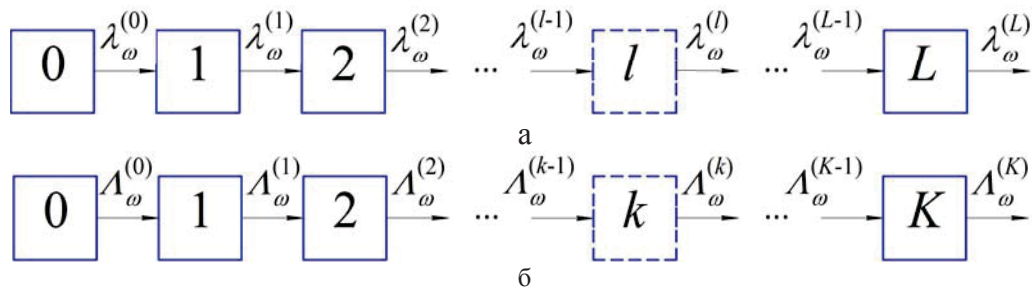


Рисунок 2 – Графи зміни станів як фізичні моделі зношування систем "поверхневий шар" (а) і "деталь" (б)

Джерело: розроблено авторами

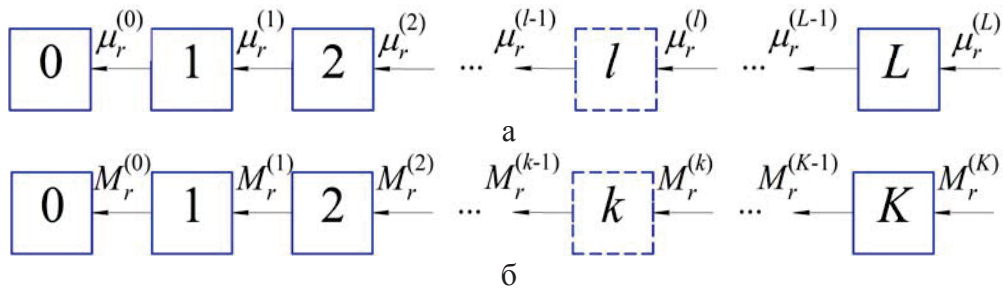


Рисунок 3 – Графи зміни станів як фізичні моделі відновлення систем "поверхневий шар" (а) і "деталь" (б)

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, стохастична модель надійності деталі зводиться до розгляду системи поверхневих шарів, елементами в яких є випадкові локальні області контактів спряжених деталей, що беруть участь в процесах тертя та зношування за певною триботехнологією з формуванням відновлювальної плівки на поверхнях деталей трибоспряження.

Розглядаючи систему "поверхневий шар" деталі, передусім будемо вважати, що сукупність її станів дискретна, а проміжок часу протягом якого відбувається процес зношування є безперервним. Система "поверхневий шар" деталі складається з ij елементів, що являють собою локальні області контактів, інтенсивності відмов яких залежить від часу і від їх кількості, що не відмовили на даний момент часу. Під відмовою локальних областей контактів поверхневого шару будемо розуміти досягнення в них такої величини зношування, яка є більшою або рівною граничній його величині. Для побудови моделі надійності системи "поверхневий шар" використаємо метод псевдостанів [10-12]. Під псевдостаном такої системи будемо розуміти такий стан S системи в якому зношується ij локальних областей контакту з ймовірністю P_k в момент часу t . Якщо кількість локальних областей контактів становить $l=0$, то спостерігається відмова систем "поверхневий шар", яка перейде у ювенільний поглинаючий стан. Граф станів псевдосистеми "поверхневий шар" при зношуванні і відновленні наведено на рис. 3.

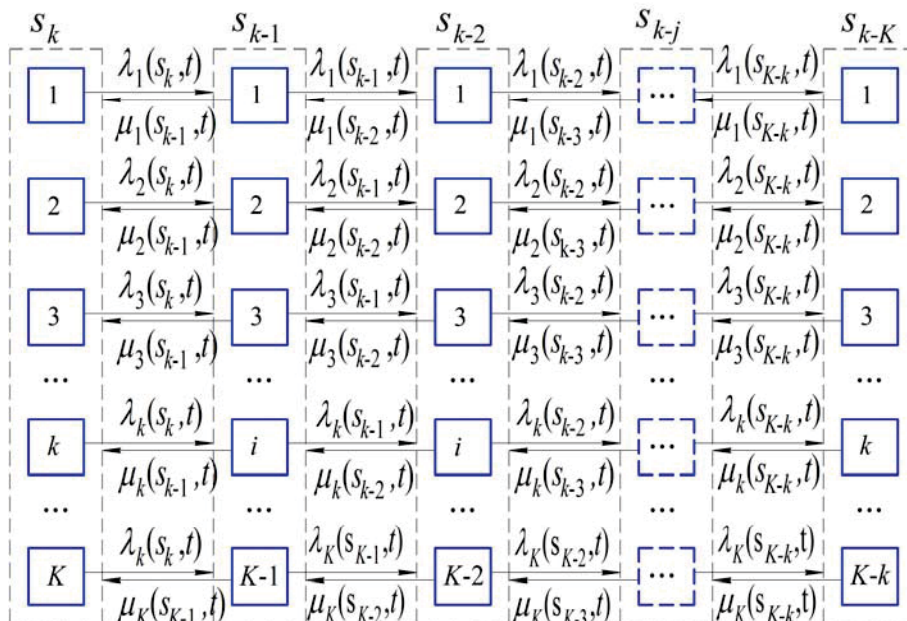


Рисунок 3 – Фрагменти графів станів псевдосистеми "поверхневий шар"

Джерело: розроблено авторами

Можна бачити, що в псевдостані $S_l \in l$ робочих локальних областей контактів, які мають свою інтенсивність відмов $\lambda_k(S_k, t)$ і інтенсивність відновлювання $\mu_k(S_k, t)$, $k = \overline{1, K}$. Будь-яка з k локальних областей контактів може перевести систему "поверхневий шар" в стан S_{k-1} . З плином часу це може бути стан S_{k-2} , S_{k-3} і т.д. до S_{k-K} .

Для опису поведінки такої системи можна скласти систему стохастичних диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP_c(t)}{dt} = -\sum_{i=1}^a (\lambda_i(S_c, t) \cdot P_\omega(t)) + \sum_{j=1}^b (\mu_j(S_c, t) \cdot P_r(t)); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{a+1} (\lambda_i(S_{k+1}, t) \cdot P_{a+1}(t)) - \sum_{i=1}^a (\lambda_i(S_k, t) \cdot P_k(t)) - \sum_{j=1}^{b+1} \mu(S_{b+1}, t) \cdot P_{b+1}(t) + \sum_{j=1}^b \mu_j(S_b, t) \cdot P_b(t), \end{cases} \quad (1)$$

де $P_k(t)$ – ймовірність знаходження псевдосистеми в S_k стані; $\lambda_k(S_k, t)$ – інтенсивність відмови k -ої локальної області контакту, $k = \overline{1, K}$, в залежності від псевдостану системи S_k і часу t .

Зазначимо, що в початковий момент часу $t=0$ всі локальні області контактів шару знаходяться в робочому стані: $p_K(t=0)=1$; $p_k(t=0)=0$ при $k < K$.

Згідно граничної теореми для сумарного потоку система стохастичних диференціальних рівнянь може бути спрощена, якщо вважати що $\sum_{k=1}^K (\lambda_k(S_k, t) = \Lambda(S_k, t)$,

де $\Lambda(S_k, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_k в стан S_{k-1} , $k=K, \dots, 0$. Враховуючи це, система (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dP_r(t)}{dt} = -\Lambda_\omega(S_k, t) \cdot P_k(t) + M_r(S_k, t) \cdot P_r(t); \\ \frac{dP_\omega(t)}{dt} = \Lambda_\omega(S_{k+1}, t) \cdot P_{k+1}(t) - \Lambda_\omega(S_k, t) \cdot P_{\omega k}(t) - M_r(S_{k+1}, t) \cdot P_{k+1}(t) + M_r(S_{k+1}, t) \cdot P_{\omega k}(t), \end{cases} \quad (2)$$

де $\Lambda_\omega(S_k, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_k в стан S_{k-1} ; $\Lambda(S_{k+1}, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_{k+1} в стан S_k ; $\Lambda(S_k, t)$ – сумарний потік відмов, який переводить систему із стану S_k в стан S_{k-1} .

Використання сумарного потоку станів поверхневого стану деталей дозволяє перейти до розгляду процесів деградації псевдостанів системи "поверхневий шар" і її відмови. Поведінка такої системи описується системою стохастичних диференціальних рівнянь (2), розв'язок якої визначається видами функцій $\Lambda(S_k, t)$ і $M_r(S_k, t)$. Якщо ця функція задана в загальному вигляді, то розв'язок системи є проблематичним. Разом з тим існує ряд часткових розв'язків, які можна використати в аналізі поведінки системи "поверхневий шар" деталі.

Аналізуючи процеси зношування робочих поверхонь спряжень систем і агрегатів деталей сільськогосподарської та транспортної техніки, можна виділити наступні випадки, які поширені на практиці:

– стаціонарне зношування, коли швидкість зношування поверхневого шару є постійною величиною і не залежною від часу і кількості робочих локальних областей контактів підшарів;

– нестационарне зношування, яке в свою чергу містить декілька випадків, у відповідності до інтенсивності зношування локальних областей контактів: не залежить від того скільки з них є робочі, а залежить тільки від тривалості процесів зношування; не залежить від часу, а залежить від робочої кількості локальних областей контактів; залежить як від тривалості зношування, так і від кількості робочих локальних областей контактів. Аналогічні випадки і для процесів відновлення при реалізації ТТП і ТТВ.

Розглянемо процес стаціонарного зношування поверхневого шару деталі. Оскільки швидкість зношування, а отже і сумарний потік відмов локальних областей контактів поверхневого шару, є сталою величиною, не залежною від часу і кількості робочих локальних областей шару, то маємо: $\Lambda(S_k, t) = \text{const} = \Lambda$. При цьому система стохастичних диференціальних рівнянь станів поверхневого шару при наявності процесів зношування набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dP_{\omega k}(t)}{dt} = -\Lambda_K \cdot P_{\omega k}(t); \\ \frac{dP_{\omega k}(t)}{dt} = \Lambda_k \cdot P_{\omega(k+1)}(t) - \Lambda_k \cdot P_{\omega(k)}(t). \end{cases} \quad (3)$$

При наявності процесів відновлення система рівнянь має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dP_k(t)}{dt} = -\Lambda_K \cdot P_{\omega k}(t) + M_{rK} \cdot P_K(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \Lambda_k \cdot P_{\omega(k+1)}(t) - \Lambda_k \cdot P_{\omega(k)}(t) - M_k P_{r(k+1)} + M_k P_{r(k)}(t). \end{cases} \quad (4)$$

Систему рівнянь (3) можна розв'язати при початкових умовах: $P_k(t=0) = 1$; $P_K(t=0) = 1$ при $k < K$. Враховуючи початкові умови, маємо наступні рішення для системи "поверхневий шар" при наявності процесів зношування:

$$\begin{cases} P_K(t) = \exp(-\Lambda t); \\ P_k(t) = \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t); \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t). \end{cases} \quad (5)$$

З урахуванням процесів відновлення система розв'язків (5) набуває вигляду:

$$\begin{cases} P_K(t) = \exp(-\Lambda t) - \exp(-Mt); \\ P_k(t) = \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t) - \frac{(Mt)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-Mt); \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{(\Lambda t)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\Lambda t) + \sum_{k=1}^K \frac{(Mt)^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-Mt). \end{cases} \quad (6)$$

Зазначимо, що при цьому математичне очікування і дисперсія k -го стану системи "поверхневий шар" будуть рівні між собою в процесах зношування та відновлення:

$$M(K-k) = D(K-k) = \Lambda t = Mt. \quad (7)$$

Розглянемо нестационарне зношування системи "поверхневий шар", яке містить в собі три випадки. Проаналізуємо кожен із цих випадків.

У першому випадку інтенсивність зношування та відновлення локальних областей контактів поверхневого шару не залежить від робочої їх кількості, а є лише функцією часу. Сумарний потік відмов системи "поверхневий шар" також є тільки функцією часу і не залежить від стану S_k системи. Система стохастичних диференціальних рівнянь (2) при цьому має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dP_K(t)}{dt} = -\Lambda(t) \cdot P_K(t) + M(t)P_K(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \Lambda(t) \cdot P_{k+1}(t) - \Lambda(t) \cdot P_k(t) - M(t)P_{k+1} + M(t)P_k(t). \end{cases} \quad (8)$$

Для початкових умов: $P_K(t=0) = 1$; $P_k(t=0) = 1$; при $k < K$. Згідно граничної теореми сумарного потоку, сумарна інтенсивність відмов $\Lambda(t)$ та відновлення $M(t)$ системи "поверхневий шар" являє собою нестационарний потік Пуассона. Розв'язком системи стохастичних диференціальних рівнянь (8) буде система випадкових функцій:

$$\begin{cases} P_K(t) = \exp(-\alpha(t)) - \exp(-\beta(t)); \\ P_k(t) = \frac{(K(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\alpha(t)) - \frac{(M(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\beta(t)); \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K \frac{(K(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\alpha(t)) + \sum_{k=1}^K \frac{(M(t))^{K-k}}{(K-k)!} \exp(-\beta(t)), \end{cases} \quad (9)$$

де $\alpha(t) = \int_0^t \Lambda(t) dt$ – параметр закону зміни потоку відмов зношування;

$\beta(t) = \int_0^t M(t) dt$ – параметр закону зміни потоку відмов системи "поверхневий шар".

У другому випадку інтенсивності зношування та відновлення локальних областей контактів в системі "поверхневий шар" не залежать від кількості з них працюючих в заданий момент часу. Якщо інтенсивність відмов $\lambda_k(S_k)$ та відновлень $\mu_k(S_k)$ локальних областей контактів спряжених робочих поверхонь деталей, при k працюючих, подається через інтенсивність відмов $\lambda_K(S_K)$ та відновлень $\mu_K(S_K)$ локальних областей контактів в початковий момент часу, то маємо:

$$\lambda_K(S_K) = K\lambda_k(S_k); \quad \mu_K(S_K) = K\mu_k(S_k). \quad (10)$$

Враховавши зазначене в стохастичній диференціальній системі рівнянь (1), отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{dP_K(t)}{dt} = -\sum_{k=1}^K n\lambda_k(S_k) \cdot P_K(t) + \sum_{k=1}^K K\mu_k(S_k) \cdot P_K(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{k+1} (k+1)\lambda_k(S_{k+1}) \cdot P_{k+1}(t) - \sum_{k=1}^k k\lambda_k(S_k) \cdot P_k(t) - \sum_{k=1}^{k+1} (k+1)\mu_k \cdot P_{k+1}(t) + \sum_{k=1}^k k\mu_k(S_k) \cdot P_k(t). \end{cases} \quad (11)$$

Підсумовуючи потік відмов та відновлень системи "поверхневий шар", система стохастичних диференціальних рівнянь (11) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dP_k(t)}{dt} = -K\Lambda \cdot P_k(t) + K\mu \cdot P_k(t); \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = (k+1)\Lambda \cdot P_{k+1}(t) - k\Lambda \cdot P_k(t) - (k+1)M \cdot P_{k+1}(t) - kM \cdot P_k(t), \end{cases} \quad (12)$$

де Λ – сумарний потік відмов, а M – сумарний потік відновлень, в початковий момент часу в стані системи "поверхневий шар" S_k , $K\Lambda = \Lambda_K$, $KM = M_K$. При цьому система рівнянь (12) має розв'язок:

$$\begin{cases} P_k(t) = \exp(-K\Lambda t) - \exp(-KMt); \\ P_{K-k}(t) = \frac{\Lambda^k K!}{(K-k)! \Lambda^k} \frac{1}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)} \frac{\exp((K-k)\Lambda t)}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)} - \frac{M^k K!}{(K-k)! M^k} \frac{1}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)} \frac{\exp((K-k)Mt)}{\sum_{l=0}^k \prod_{h=0}^k (i-h)/(i-l)}; \\ P_0(t) = 1 - \sum_{k=0}^{k-1} P_{K-k}(t) + \sum_{k=0}^K P_{K-k}(t). \end{cases} \quad (13)$$

Для даного розв'язку математичне очікування і дисперсія знаходяться за формулами:

$$M(k) = \sum_{k=1}^K k P_k(t); \quad D(k) = \sum_{k=1}^K k^2 P_k(t) - \left(\sum_{k=1}^K k P_k(t) \right)^2. \quad (14)$$

У третьому випадку інтенсивність зношування і відновлення локальних областей контактів системи "поверхневий шар" являються функціями часу і кількості з них працюючих. При цьому сумарний потік їх відмов та відновлення подається через сумарний потік відмов у початковий момент часу:

$$\Lambda(S_k, t) = \frac{\Lambda(S_K) + at}{1 + at}, \quad M(S_k, t) = \frac{M(S_K) + at}{1 + at}, \quad (15)$$

де $\Lambda(S_k, t)$, $M(S_k, t)$ – сумарна інтенсивність потоку відмов системи "поверхневий шар" в початковий момент часу в стані S_k ;

a – величина, що є сталою для даних умов і визначається значенням функції двох змінних $\Lambda(S_k, t)$, $M(S_k, t)$.

При цьому розв'язок системи рівнянь (2) набуває вигляд, що характеризує закономірності процесу Пойа для деградації і відновлення системи "поверхневий шар":

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P_K(t) = (1 + \Lambda(S_K)at)^{-\frac{1}{a}} - (1 + M(S_K)at)^{-\frac{1}{a}}; \\
 P_K(t) = (\Lambda(S_K)t)^{K-k} (1 + \Lambda(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!} - \\
 - (M(S_K)t)^{K-k} (1 + M(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!}; \\
 P_0(t) = 1 - \sum_{k=1}^K (\Lambda(S_K)t)^{K-k} (1 + \Lambda(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!} + \\
 + \sum_{k=1}^K (M(S_K)t)^{K-k} (1 + M(S_K)at)^{-(K-k)-\frac{1}{a}} \frac{(1+a)(1+2a)\dots(1+(K-k-1)a)}{(K-k)!}..
 \end{array} \right. \quad (16)$$

Висновки:

1. Початкове задання системи "поверхневий шар" із залежними локальними областями контактів зводиться до процесів її деградації (зношування і відмов), а також відновлення шляхом використання граничної теореми потоків.

2. В залежності від вигляду функції інтенсивності сумарного потоку відмов і відновлення наведені часткові рішення систем стохастичних диференціальних рівнянь Колмогорова.

3. Отримані розв'язки не можуть задовольнити існуюче різноманіття умов функціонування трибоспрязень деталей машин та залежностей швидкості зношування і відновлення їх робочих поверхонь з більш складним виглядом. У загальному вигляді систему диференціальних рівнянь доцільно розв'язувати чисельними методами.

4. Виявлено, що ефективним є аналіз часткових випадків, особливо коли розглядаються стохастичні процеси з безперервним перебігом часу і дискретними станами системи.

5. Викликає інтерес і випадкові процеси з дискретним перебігом часу і станами та ефективність їх розв'язання є використанням математичного апарату ланцюгів Маркова.

Список літератури

1. Замота Т.Н., Аулін В.В. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография. Кировоград: изд. Лысенко В.Ф., 2015, 303 с.
2. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія / Аулін В.В. та ін.; за ред. В.В. Ауліна. Кропивницький: Лисенко В. Ф. 2016. 303 с.
3. Аулін В.В., Лисенко С.В., Замота Т.М. Зменшення механічних втрат в основних спряженнях деталей дизелів МСГТ і АТТ триботехнологіями відновлення. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Техніка та енергетика АПК.* 2017. Вип.262. С.211-227.
4. Трибологические переходы при приработке поверхностей трения сопряжений деталей / Аулін В.В. и др. *Проблеми трибології.* 2017. № 4. С. 87-96.
5. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів / Аулін В.В. та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: науковий журнал.* 2018. №1(10). С. 5-11.
6. Аулін В.В., Лисенко С.В. Фізико-технологічні засади підвищення надійності трибосистем дизелів мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ: науково-теоретичний збірник.* 2014. вип. № 2 (45), т.4, ч.ІІ. С. 56-68.
7. Аулін В.В., Замота Т.Н., Лысенко С.В. Повышение эксплуатационной износостойкости деталей

- машин их триботехническим восстановлением и управлением процессами приработки. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol.18. No.2. P. 89-96.
8. Аулин В.В., Замота Т.Н. Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения. *Проблеми трибології*. 2012. №1. С.9-13.
 9. Аулин В.В., Замота Т.Н., Лысенко С.В. Повышение долговечности мобильной сельскохозяйственной и автотранспортной техники триботехнологиями приработки основных сопряжений деталей двигателей. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №8. С. 55-68.
 10. Сорокатый Р.В., Кузьменко А.Г. Определение параметров модели процессов изнашивания представленных в виде цепи Маркова. *Проблемы трения и изнашивания*. 1995. №1. С. 14-20.
 11. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов. монография. Хмельницкий: ХНУ, 2009. 242 с.
 12. Sorokatyj, R.V. Modeling the behavior of tribosystems using the method of triboelements. *Trenie i Iznos*. 2002. №23 (1), pp. 16-22.
 13. Аулін, В.В., Лисенко С.В., Білик А.П. Трибофізичне та фізико-технологічне обґрунтування комбінованого функціонально-спрямованого зміцнення та модифікування деталей і робочих органів СГТ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2014. Вип. 44. С. 92-103.
 14. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. 370 с.
 15. Масштабно-рівневий підхід до аналізу процесів в матеріалах трибоспрязень деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки / Аулін В.В., Лисенко С.В., Великодний Д.О., Гупка А.Б. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип.47,ч.І. С.52-59.
 16. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. ... д-ра. техн. наук : 05.02.04 / КНТУ. Кіровоград, 2014. 447 с.
 17. Алексеев В.П. Электрохимико-механическая макроприработка деталей: монография. Луганск: Элтон-2, 2011. 204 с.
 18. Аулін В.В. Основні синергетичні компоненти прояву різних форм самоорганізації в триботехнічних системах. Зб. м-лів міжнар. наук.-практ. конф. "Ольвійський форум - 2012", Ялта., 2012. т. 12. С.60-62.
 19. Аулін В.В., Кузик О.В. Системно-спрямований підхід та синергетична концепція реалізації процесів і станів самоорганізації матеріалів елементів, робочих та технологічних середовищ триботехнічних систем. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту.* 2014. Вип. 27. С.78-87.
 20. Аулин В.В., Лысенко С.В. Технологии триботехнического восстановления изношенных поверхностей деталей с использованием композиционного масла и воздействия физических полей. *Проблемы автомоб.-дорожного комплекса России: Эксплуатация и развитие автомоб. транспорта: м-лы X междунар.заочн.науч.-техн. конф. 21 ноября 2013 г.* Пенза: ПГУАС, 2013. С.7-16.
 21. Аулін В.В. Методологія розв'язання проблеми підвищення зносостійкості деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ*. 2014. Вип. № 2 (45), т.4, ч.ІІ. С. 80-91.
 22. Аулін В.В., Лисенко С.В., Лисенко В.М. Триботехнічне відновлення протягом строку служби дизелів. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. 2007. №2 (44). С. 60-62.
 23. Кравец И.А. Ремонтная регенерация трибосистем. Тернополь: Бережанский агротехн. ин-т, 2003. 284 с.
 24. Войтов В.А., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н., Стадниченко В.Н. Технологии триботехнического восстановления. Обзор и анализ перспектив. *Проблеми трибології*. 2005. №2. С. 86-94.
 25. Сафонов Б.П., Трещёв С.Г., Лукиенко Л.В., Сазонов В.Д. О применении триботехнических составов для повышения ресурса тяжело нагруженных деталей машин. *Вестник машиностроения*. 2003. №6. С. 39-43.
 26. Войтов В. А., Білик А.П., Сторожук В.В. Реологічні дослідження мікроструктурних змін захисного покриття, яке утворене за допомогою триботехнічної відновлювальної суміші ТВС „Комбат”. *Проблеми трибології*. 2008. № 1. С. 34-38.
 27. Стадниченко М.Г. та ін. Оцінка ефективності використання технологій триботехнічного відновлення для подовження ресурсу засобів наземного забезпечення дій авіації. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2012. № 1. С. 32-34.
 28. Aulin V. et al. Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. *Problems of tribology*. 2019. Vol. 92, no. 2. С. 55-60.
 29. Aulin V. et al. Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by

- tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology*. 2019. Vol. 91, no. 1. С. 73-80.
30. Aulin V. et al Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. *Tribology in Industry*. 2019. Vol. 41. №. 2. P. 156-165.
 31. Аулін В.В. та ін. Напружено-деформований стан поверхневого шару деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С.103-113.
 32. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В. Синергетика підвищення надійності машин використанням моделей марківських процесів. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*: зб. тез V Всеукр. наук.-практ. конф., 28-29 бер. 2019 р. Житомир: ЖАТК, 2019. С. 242-245.
 33. Аулін В.В. Системно-спрямований підхід до розробки технологій безрозбірного відновлення спряжень деталей. Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції "Крамаровські читання", 21-22 лют. 2019 р., м. Київ: НУБіП, 2019. С. 94-96.
 34. Аулін В.В. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2018. №1(10). С. 5-11.
 35. Аулін В. В., Лисенко С.В., Кузик О.В., Жилова І.В. Фізико-мезомеханічний підхід до виявлення характеру зношування спряжень деталей сільськогосподарської і автотранспортної техніки. *Проблеми трибології*. 2017. № 4. С. 82-86.
 36. Aulin V. et al. Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 3(12). С. 6-16.
 37. Аулін В.В., Лисенко С.В., Замота Т.М. Зменшення механічних втрат в основних спряженнях деталей дизелів МСГТ і АТТ триботехнологіями відновлення. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 262. С. 211-227.

References

1. Zamota, T.N., Aulin, V.V. (2015). *Upravlenie protsessami prirabotki osnovnykh sopryazheniy detaley mashin pri izgotovlenii i remonte [Management of the running-in processes of the main interfaces of machine parts in the manufacture and repair]*. Kirovograd: izd. Lyisenko V.F. [in Russian].
2. Aulin, V.V. at all. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki trybotekhnichnogo vidnovlennia: monohrafiia [Tribophysical fundamentals of increasing the reliability of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnical recovery technologies: monograph]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zamota, T.M. (2017). *Zmenschennia mekhanichnykh vtrat v osnovnykh spriazhenniakh detalei dyzeliv MSHT i ATT trybotekhnolohiiamy vidnovlennia [Reduction of mechanical losses in the main conjugations of the details of the MSCM and MV diesels with tribotechnology of restoration]*. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser.: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser.: APC Engineering and Energy, Issue 262, 211-227* [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V. at al. (2017). *Tribologicheskie perehody pri prirabotke poverhnostej treniya sopryazhenij detalej [Tribological transitions in the fitting of friction surfaces of joints of parts]*. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, № 4, 87-96* [in Russian].
5. Aulin, V.V. et al. *Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnogo vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies to improve the durability and durability of the conjugations of vehicle parts]*. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: scientific journal, №1(10), 5-11* [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. (2014). *Fyzyko-tekhnolohichni zasady pidvyshchennia nadiinosti trybosystem dyzeliv mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki [Physico-technological principles of increasing the reliability of tribosystems of diesels of mobile agricultural machinery]*. *Visnyk ZhNAEU: naukovoteoretychnyi zbirnyk - ZhNAEU Bulletin: scientific and theoretical collection, issue. № 2(45), T. 4, part II. 56-68* [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2016). *Povyshenie ekspluatacionnoy iznosostoykosti detaley mashin ih trybotekhnicheskim vosstanovleniem i upravleniem protsessami prirabotki [Improving the operational wear resistance of machine parts by their tribotechnical restoration and management of*

- running-in processes]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.18, No.2*, 89-96 [in Russian].
8. Aulin, V.V., Zamota, T.N. (2012). Razvitie ploschadi pyatna kontakta pri makroprirobotke poverhnostey treniya [The development of the area of the contact spot during macroprocessing of friction surfaces]. *Problemi tribologii – Problems of tribology, №1*, 9-13 [in Russian].
 9. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2017). Povyshenie dolgovechnosti mobil'noy sel'skohozyaystvennoy i avtotransportnoy tehniky tribotekhnologiyami prirobotki osnovnykh sopryazheniy detaley dvigateley [Improving the longevity of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnologies of running-in of the main interfaces of engine parts]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes, №8*, 55-68 [in Russian].
 10. Sorokatyj, R.V., Kuzmenko, A.G. (1995). Opredelenie parametrov modeli processov iznashivaniya predstavlenykh v vide cepi Markova [Determination of the parameters of the wear process model presented in the form of a Markov chain]. *Problemy treniya i iznashivaniya – Friction and Wear Problems. №1*, 14-20 [in Russian].
 11. Sorokatyj, R.V. (2009). *Metod triboelementov. monografiya [The method of triboelements. monograph]*. Hmel'nickij: HNU. 242 s. [in Russian].
 12. Sorokatyj, R.V. (2002). Modeling the behavior of tribosystems using the method of triboelements. *Trenie i Iznos, №23 (1)*, 16-22 [in English].
 13. Aulin, V.V., Lysenko S.V., Bilyk A.P. (2014). Trybofizychni ta fizyko-tekhnologichne obgruntuvannya kombinovanoho funktsionalno-spriamovanoho zmitsnennia ta modyfikuvannya detalei i robochykh orhaniv SHT [Tribophysical and physico-technological substantiation of combined functionally directed strengthening and modification of parts and working bodies of the SGT]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichniy zbirnyk – Design, production and operation of agricultural machines: National interagency scientific and technical collection, Vol. 44*, 92-103 [in Ukrainian].
 14. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: monografiia [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: monograph]*. Kirovohrad: Vyd. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
 15. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Velykodnyi, D.O. & Hupka, A.B. (2017). Masshtabno-rivnevyy pidkhid do analizu protsesiv v materialakh trybospriazhen detalei mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki [A scale-level approach to the analysis of processes in tribal materials of details of mobile agricultural and motor vehicles] *Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichniy zbirnyk. Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – National interagency scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines, Issue 47, Part II*, 52-59 [in Ukrainian].
 16. Aulin, V.V. (2014). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniki [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]: dys. ... d-ra. tekhn. nauk : 05.02.04 / KNTU. Kirovohrad. 447 s [in Ukrainian].
 17. Alekseev, V.P. (2011). *Elektrokhimiko-mekhanicheskaya makroprirobotka detalej: monografiya [Electrochemical-mechanical macroprocessing of parts: monograph]*. Lugansk: Elton-2 [in Russian].
 18. Aulin, V.V. (2012). Osnovni synerhetychni komponenty proiavu riznykh form samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh [The main synergistic components of manifestation of various forms of self-organization in tribotechnical systems]. *Zb. m-liv mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Olviyskiy forum - 2012" – Coll. materials international. Research Practice Conf. "Olvia Forum 2012"*, Yalta. t. 12. 60-62 [in Ukrainian].
 19. Aulin, V.V. & Kuzyk, O.V. (2014). Systemno-spriamovanyi pidkhid ta synerhetychna kontseptsiiia realizatsii protsesiv i staniv samoorhanizatsii materialiv elementiv, robochykh ta tekhnologichnykh seredovyshch trybotekhnichnykh system [System-oriented approach and synergetic concept of realization of processes and states of self-organization of materials of elements, working and technological environments of tribotechnical systems]. *Zb. nauk. prats KNTU/ Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobud., avtomatyzatsiia – Coll. Sciences. of KNTU / Engineering in agricultural production, industry machine building., automation*, Vol. 27, 78-87 [in Ukrainian].
 20. Aulin, V.V. & Lysenko, S.V. (2013). Tehnologii tribotekhnicheskogo vosstanovleniya iznoshennykh poverhnostey detalej s ispolzovaniem kompozitsionnogo masla i vozdejstviya fizicheskikh polej [Technologies for tribotechnical restoration of worn surfaces of parts using composite oil and exposure to physical fields]. *Problemy avtomob.-dorozhnogo kompleksa Rossii: Ekspluatatsiya i razvitie avtomob. transporta – Problems of the automobile-road complex of Russia: Operation and development of*

- automobile. Transport: m-ly X mezhdunar.zaoch.nauch.-tehn. konf. 21 noyabrya 2013 g. Penza: PGUAS, S.7-16 [in Russian].*
21. Aulin, V.V. (2014). Metodolohiia rozviazannia problemy pidvyshchennia znosostiikosti detalei i robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniki [Methodology for solving the problem of increasing the wear resistance of parts and working bodies of agricultural machinery]. *Visnyk ZhNAEU – Bulletin of ZhNAEU, Vol. № 2 (45), t.4, ch.II*, 80-91 [in Ukrainian].
 22. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Lysenko, V.M. (2007). Trybotekhnichne vidnovlennia protiahom stroku sluzhby dyzeliv [Tribotechnical restoration during the diesel service life]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology, №2 (44)*, 60-62 [in Ukrainian].
 23. Kravec, I.A. (2003). Reparativnaya regeneraciya tribosistem [Reparative regeneration of tribosystems]. Ternopol: Berezhanskij agrotehn. in-t [in Russian].
 24. Vojtov, V.A., Stadnichenko, N.G., Dzhus, R.N. & Stadnichenko, V.N. (2005). Tehnologii tribotekhnicheskogo vosstanovleniya. Obzor i analiz perspektiv [Tribotechnical recovery technologies. Overview and analysis of prospects]. *Problemi tribologiyi – Problems of tribology, №2*, 86-94 [in Russian].
 25. Safonov, B.P., Treshyov, S.G., Lukienko, L.V., Sazonov, V.D. (2003). O primenenii tribotekhnicheskikh sostavov dlya povysheniya resursa tyazhelo nagruzhennykh detalej mashin [On the use of tribological compositions to increase the resource of heavily loaded machine parts]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of mechanical engineering, №6*, 39-43 [in Russian].
 26. Voitov, V.A., Bilyk, A.P. & Storozhuk, V.V. (2008). Reolohichni doslidzhennia mikrostrukturnykh zmin zakhysnoho pokryttia, yake utvorene za dopomohoiu trybotekhnichnoi vidnovliuvanoi sumishi TVS, „Kombat” [Rheological studies of the microstructural changes of the protective coating, which is formed with the help of a tribotechnical restorative mixture of the TVS, „Kombat”]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology, № 1*, 34-38 [in Ukrainian].
 27. Stadnichenko, M.H. et al. (2012). Otsinka efektyvnosti vykorystannia tekhnolohii tribotekhnichnoho vidnovlennia dlia podovzhenntia resursu zasobiv nazemnoho zabezpechennia dii aviatsii [Assessment of the efficiency of the use of tribotechnical recovery technologies to extend the aviation ground support resources]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, № 1*, 32-34 [in Ukrainian].
 28. Aulin, V. et al. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. *Problems of tribology, Vol. 92, no. 2*, 55-60 [in English].
 29. Aulin, V. et al. (2019). Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology, Vol. 91, no. 1*, 73-80 [in English].
 30. Aulin, V. et al. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. *Tribology in Industry, Vol. 41. №. 2*, P. 156-165 [in English].
 31. Aulin, V.V. et al. (2019). Napruzhenno-deformovanyi stan poverkhnevoho шарu detalei pry realizatsii trybotekhnolohii prypratsiuvannia i vidnovlennia [Stress-deformed state of the surface layer of parts in the implementation of tribotechnology of working out and restoration]. *Tsentrálnoukraiński naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Engineering sciences, Vyp. 1(32)*, 103-113 [in Ukrainian].
 32. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko S.V., Holub, D.V. (2019). Synerhetyka pidvyshchennia nadiinosti mashyn vykorystanniam modelei markivskykh protsesiv [Synergetics of increasing machine reliability using models of Markov processes]. *Perspektyvy i tendentsii rozvytku konstruksii ta tekhnichnoho servisu silskohospodarskykh mashyn i znariad – Prospects and tendencies of development of designs and technical service of agricultural machines and implements: zb. tez V Vseukr. nauk.-prakt. konf.*, 28-29 ber. 2019 r. Zhytomyr: ZhATK, S. 242-245 [in Ukrainian].
 33. Aulin, V.V. (2019). Systemno-spriamovanyi pidkhid do rozrobky tekhnolohii bezrozbirnoho vidnovlennia spriazhen detalei [System-oriented approach to the development of indiscriminate repair of joints of parts]. *Zbirnyk tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii "Kramarovski chytannia" – Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference "Kramar Readings"*, 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv: NUBiP, S. 94-96 [in Ukrainian].
 34. Aulin, V.V. (2018). Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies to improve the durability and durability of the coupling of vehicle parts]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport, 1(10)*, 5-11 [in Ukrainian].
 35. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V. & Zhylova, I.V. (2017). Fyzyko-mezomekhanichni pidkhid do vyjavlennia kharakteru znoshuvannia spriazhen detalei silskohospodarskoi i avtotransportnoi tekhniki [Physico-mesomechanical approach to detecting the nature of the wear of the coupling of agricultural and

- motor vehicle parts]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology*, 4, 82-86 [in Ukrainian].
36. Aulin V. et al. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *East European Journal of Advanced Technology*, 3(12), 6-16 [in English].
37. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Zamota, T.M. (2017). Zmenshennia mekhanichnykh vtrat v osnovnykh spriazhenniakh detalei dyzeliv MSHT i ATT trybotekhnolohiiamy vidnovlennia [Reduction of mechanical losses in the main interconnections of details of diesel engines MSGT and ATT by tribotechnology of restoration]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser.: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser.: APC Engineering and Energy*, 262, 211-227 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Sergey Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrey Grinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., Doctoral student

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Reliability Model of Parts of Transport Vehicles for the Implementation of Tribological Technologies for Their Running-in and Recovery

The necessity of building physical and mathematical models of reliability with the consideration of random processes and the number of local areas during wear and restoration using tribotechnologies of working out and restoration is substantiated. The change of states of systems of a surface layer and a part as a whole is presented in the form of graphs for cases of research of processes of wear and restoration and their consideration as systems. Technical states are represented as discrete sets. A pseudostate method was used to build the reliability model and a graph was developed that combined processes of wear and restoration of surface layers of parts.

The surface model of the workpiece consists of k sublayers. The behavior of the surface layer system is considered in terms of reliability as the behavior of a system of sets of interdependent local contact areas. The stochastic model of part reliability is reduced to a system of surface layers with random local contact areas of conjugated parts. The graph of the pseudostates of the surface layer system under different conditions is given. A system of stochastic differential equations is obtained to consider the processes of degradation and reconstruction of pseudostates and give partial solutions to it.

Three partial cases of non-stationary wear and restoration of the surface layer system are considered: the intensity of these processes in the local contact areas of the surface layer do not depend on their working quantity, but are only a function of time; the intensity of wear and tear in local contact areas is independent of the number of them working at a given time; the wear and tear intensity is a function of time and number of working contacts.

It is determined that the efficiency of the process of solving problems, reflected in partial cases, is significantly increased when using the mathematical apparatus of Markov chains.

reliability, tribological technologies of running-in, tribotechnologies of restoration, physical model of reliability, surface layer, transport machines

Одержано (Received) 03.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019