

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

БСКІРОВ АБЛЯТІФ ШЕВКЕТОВИЧ

УДК 621.891

**МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРИБОСИСТЕМАХ
МАШИН ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ПРОГРАМИ ЇХ
ПРИПРАЦЮВАННЯ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Войтов Віктор Анатолійович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
завідувач кафедри транспортних технологій і
логістики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дворук Володимир Іванович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри теоретичної та прикладної фізики

кандидат технічних наук, доцент
Кубіч Вадим Іванович,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
доцент кафедри автомобілів

Захист дисертації відбудеться “02” жовтня 2020 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.832.03 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: просп. Московський, 45, ауд. 204, м. Харків, 61050.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002.

Автореферат розісланий “28” серпня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.О. Градиський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Під час проектування нової техніки вирішують багатопараметричне завдання метою якого є зносостійкість, мінімальні втрати на тертя і висока надійність. Для досягнення такої мети в трибології застосовуються різні методи моделювання, які дозволяють скоротити об'єм лабораторних і стендових випробувань нових машин в процесі їх проектування та доводки.

Відсутність спеціальних методик розрахунку на зносостійкість ускладнює вибір оптимальних варіантів конструкцій трибосистем і тим більше визначення раціональних режимів припрацювання і експлуатації. В результаті трибосистеми проектуються з «запасом по зносостійкості» або мають недостатній ресурс, що призводить до простоїв і ремонту в процесі експлуатації.

Процес припрацювання трибосистем є динамічним процесом, тому що пов'язаний з великою різноманітністю складних за своєю природою і впливом на ці процеси факторів. Тому вид математичної динамічної моделі необхідно шукати у вигляді диференціальних рівнянь, які з точністю до коефіцієнтів будуть описувати перехідний процес. Такі моделі повинні враховувати не тільки зміну шорсткості поверхонь тертя, а і зміни, що відбуваються в структурі матеріалів поверхневих шарів елементів трибосистеми під дією мастильного середовища. При цьому необхідно виконати структурну і параметричну ідентифікацію математичної моделі та визначити вирази для коефіцієнтів підсилення і постійних часу, що входять в рішення диференціальних рівнянь.

Складність полягає в тому, що для розрахунку таких коефіцієнтів необхідно знати поточне значення параметрів процесу тертя та зношування в трибосистемах, які можна визначити тільки використовуючи динамічні методи аналізу, такі як акустична емісія, з обґрунтуванням реєстрованих параметрів і методики реєстрації та обробки сигналів.

Зв'язок роботи з науковими матеріалами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи пов'язана з виконанням Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09.2011 р. № 3715-VI. Робота виконувалась у відповідності з планом науково-дослідних робіт навчально-наукового інституту технічного сервісу ХНТУСГ ім. П. Василенка «Розробка біоолів на базі рослинних олій олеїнового типу та дослідження процесів, які відбуваються в мастильному шарі з урахуванням властивостей матеріалів трибосистем», ДР 0110U001958.

Мета та завдання досліджень. Метою роботи є дослідження перехідних процесів в трибосистемах, теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження інформативності критеріїв оцінки перехідних процесів та розробка програми ефективного припрацювання різних конструкцій трибосистем.

Відповідно до мети дослідження необхідно вирішити наступні завдання:

1. Обґрунтувати метод і інформативні параметри для реєстрації перехідних процесів в трибосистемах, а також розробити методику для обробки параметрів перехідного процесу в реальному масштабі часу.

2. Розробити математичну модель перехідних процесів в трибосистемах та виконати структурну та параметричну ідентифікацію моделі з урахуванням фактора структури матеріалів, геометричних розмірів трибоелементів, навантаження, швидкості ковзання та мастильного середовища.

3. Виконати теоретичні дослідження та отримати залежності припрацювання різних конструкцій трибосистем, експериментальним шляхом оцінити похибку моделювання.

4. Теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити критерії оцінки перехідних процесів в трибосистемах, отримати теоретичні та експериментальні залежності зміни значень критеріїв під час припрацювання.

5. Обґрунтувати і розробити структуру програми ефективного припрацювання різних конструкцій трибосистем та виконати експериментальну перевірку в лабораторних умовах.

6. Виконати експериментальну перевірку програми припрацювання на шестеренних насосах в умовах виробництва та розрахувати економічний ефект від її впровадження.

Об'єкт досліджень – процеси тертя та зношування під час припрацювання трибосистем в умовах граничного мащення.

Предмет досліджень – моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базувались на системному аналізі, механіці контактної взаємодії поверхонь тертя, термодинаміки необоротних процесів в механічних системах. Експериментальні дослідження базувались на теорії планування експерименту, математичної статистики. Лабораторні дослідження проводили за методами та методиками згідно стандартів та нормативно-технічної документації. Обробка результатів експериментів виконувалась із застосуванням стандартних комп'ютерних програм, розроблених на базі математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. Положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у наступному:

Вперше:

- отримано залежності перехідного процесу в різних конструкціях трибосистем. Показано, що характер протікання процесу припрацювання залежить від коефіцієнтів підсилення і постійних часу, які входять в диференційні рівняння, а відсутність або наявність коливань – від величини декремента загасання. Отримано вирази для визначення коефіцієнтів підсилення і постійних часу;

- отримано залежності зміни часу припрацювання трибосистем від основних факторів, що впливають на перехідний процес: коефіцієнта форми; навантаження; шорсткості поверхонь; трибологічних властивостей мастильного середовища; реологічних властивостей структури сполучених матеріалів. За отриманими теоретичним і експериментальним значеннями отримано коефіцієнт варіації величини часу припрацювання різних конструкцій трибосистем.

Отримало подальший розвиток:

- визначення добротності трибосистеми, встановлено взаємозв'язок між величиною добротності, швидкістю зношування і коефіцієнтом тертя в процесі припрацювання. Показано, що збільшення добротності знижує зазначені вище параметри, а сам критерій є мірою потенційної можливості трибосистеми пристосовуватися (адаптуватися) до умов експлуатації.

Удосконалено:

- критерії оцінки процесу припрацювання трибосистем в умовах граничного навантаження: добротності Q ; чутливості до зовнішніх впливів K_1 ; припрацювання K_2 ; інерційності при зміні зовнішніх впливів T_1 та T_2 ; стаціонарності d_1 , d_f . Обґрунтовано шляхи вибору раціональних значень критеріїв та необхідність застосування ступінчастої програми припрацювання, де швидкість ковзання і навантаження повинні змінюватися обернено пропорційно.

Практичне значення отриманих результатів.

- розроблена структура програми припрацювання трибосистем, яка складається з двох режимів. На першому режимі задається максимальне навантаження, нижче навантаження «заїдання» при мінімальній швидкості ковзання. На другому режимі задається мінімальне навантаження і максимальна швидкість ковзання. Експериментальна перевірка розробленої програми на різних конструкціях трибосистем дозволила встановити ефективність режимів припрацювання і розрахувати похибку моделювання процесу припрацювання, яка не перевищила 14,2%;

- розроблена програма обкатки шестеренних насосів НШ-10 на стенді після їх виготовлення. Ефективність розробленої програми підтверджена стендовими випробуваннями і дозволяє стверджувати, що при однаковому лінійному зносі час обкатки зменшується в 2,66 разів порівняно з базовою програмою, яка застосовується на заводі – виробнику;

- виконано оцінку економічного ефекту від впровадження розробленої програми обкатки насосів на заводі - виробнику. Річний економічний ефект за рахунок скорочення часу обкатки насосів на стенді за програмою 1200 шт. в рік складе 424300 грн. / рік.

Результати роботи прийнято до використання в «Державне підприємство «Харківське агрегатне конструкторське бюро» на етапі проектування та обкатки гідромашин.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримані здобувачем особисто [1,2]. У наукових статтях, які виконані у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: отримано теоретичні залежності зміни часу припрацювання трибосистем від основних факторів, що впливають на перехідний процес: коефіцієнта форми; навантаження; шорсткості поверхонь; трибологічних властивостей мастильного середовища; реологічних властивостей структури сполучених матеріалів [3].

Отримало подальший розвиток визначення добротності трибосистеми, теоретичними і експериментальними дослідженнями встановлено взаємозв'язок між величиною добротності, швидкістю зношування і коефіцієнтом тертя в процесі припрацювання [4,8]. Теоретично обґрунтовані й експериментально

підтверджені критерії оцінки процесу припрацювання трибосистем в умовах граничного навантаження: чутливості до зовнішніх впливів та припрацювання [5]; інерційності при зміні зовнішніх впливів [6]. Обґрунтовано вибір інформативних параметрів акустичної емісії для визначення швидкості зношування трибосистем на перехідних режимах [7]. Розроблено і обґрунтовано структуру програми припрацювання трибосистем [9].

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на III Всеукраїнській науково-практичній конференції “Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь” (Житомир, ЖНАУ, 29-30 березня 2017 р.); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених “Підвищення надійності машин і обладнання” (Кропивницький, ЦНТУ, 19-21 квітня 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва” (Харків, ХНТУСГ, 11-12 травня 2017 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції “Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy” (Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 17-19 травня 2017); Міжнародній науковій сесії “Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин” (Харків, ХНТУСГ, 21-22 березня 2018 р.); XII Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених “Підвищення надійності машин і обладнання” (Кропивницький, ЦНТУ, 18-20 квітня 2018 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 9 наукових праць (2 одноосібні), з них 7 статей у фахових виданнях, 2 – у закордонному виданні – в базі SCOPUS, 3 публікації матеріалів і тез конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 205 сторінок, у тому числі 3 додатка. Обсяг основного тексту дисертації становить 151 сторінку (6,29 авторських аркушів), 55 рисунків, 24 таблиці. Список використаних джерел нараховує 178 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ до дисертаційної роботи містить такі положення: актуальність теми; мету та завдання досліджень; особистий внесок здобувача; інформацію про апробації; відомості про структуру роботи.

У першому розділі проведено аналіз робіт, які присвячені релаксаційним процесам, сумісності матеріалів при терті та їх застосуванню в моделях тертя та зношування. Перша узагальнююча робота в цьому напрямку представлена М.О. Буше, у більш пізній роботі було уточнено поняття сумісності як здатності трибосистеми забезпечувати оптимальний стан в заданому діапазоні умов роботи за обраними критеріями. Вибору критеріїв сумісності матеріалів трибосистем присвячені роботи Б.І. Костецького і Л.І. Берщадського, які залучили до вивчення процесів тертя і зношування закони термодинаміки незворотних процесів.

За останній час з'явилася велика кількість статей, присвячених нерівноважній термодинаміці стосовно до тертя. У цих статтях наведено

експериментальні і теоретичні дослідження, що підтверджують придатність методів нерівноважної термодинаміки і теорії самоорганізації до процесів тертя. В цьому напрямку одними з перших були роботи Л.І. Бершадського і Б. Кламецькі.

В.В. Шевеля спільно з О.М. Гладченком, П.В. Назаренком та В.А. Войтовим у своїх роботах показали, що релаксаційні процеси проявляють більш високу структурну чутливість до зміни напружено-деформованого стану матеріалу при динамічному навантаженні. Останнім часом для вивчення і моделювання процесів самоорганізації та адаптації матеріалів в трибосистемах активно використовується метод рухливих клітинних автоматів (МКА), сутність якого викладена в роботах Р.В. Сорокатого та С.В. Федорова.

Подальший розвиток методів розрахунку на тертя та знос, а також моделювання процесів тертя та зношування отримано в роботах М.Ф. Семенюка, А.Г. Кузьменка, О.В. Дихі, В.І. Дворука. Сучасний підхід в дослідженнях самоорганізації в трибосистемах та припрацювання трибосистем представлено в роботах М.В. Кіндрачука, В.В. Ауліна, М.Ф. Дмитриченка, Р.Г. Мнацеканова.

Для вивчення перехідних процесів в трибосистемах та реєстрації швидкості зношування в реальному режимі часу з застосуванням метода акустичної емісії виконано аналіз робіт О.І. Свириденка, М.К. Мишкіна, В.О. Білого, В.В. Запорожця, В.М. Стадніченка та зроблено висновок, що для кількісної оцінки інтенсивності зношування в періоді припрацювання більш ефективно використовувати статистичні характеристики, наприклад дисперсію флуктацій параметрів акустичної емісії (АЕ).

На основі виконаного аналізу літературних джерел у першому розділі сформульована мета та завдання дослідження.

У другому розділі роботи описується методичний підхід, який застосовується при дослідженні характеру поведінки параметрів перехідного процесу в трибосистемі в залежності від величини вхідного впливу.

Визначено структуру та методи дослідження перехідних процесів в трибосистемах в умовах граничного навантаження, яка складається з теоретичних досліджень, експериментальної частини та розробки практичних рекомендацій щодо вибору програми припрацювання.

Зроблено вибір матеріалів, робочих середовищ і кінематичних схем контакту для проведення досліджень. Як об'єкти дослідження при розгляді задач роботи були обрані сталі і сплави, які широко застосовуються в машинобудуванні і зокрема насособудуванні. До таких матеріалів відносяться сталь 40Х, з якої виготовляється більшість валів, бронза Бр.АЖ 9-4, з якої виготовляються втулки і підшипники ковзання, сірий модифікований чавун СЧМ, з якого виготовляють похилі шайби.

Сплави і сталі були підібрані таким чином, щоб спостерігалось неухильне зростання твердості матеріалів. Твердість матеріалів, реологічні властивості структури контактуючих матеріалів (внутрішнє тертя) δ і їх температуропровідність a становила:

БрАЖ 9-4	(90...110 НВ; $\delta= 3494$; $a = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$);
СЧМ	(293 НВ; $\delta= 3315$; $a = 1,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$);

40X (45...47 HRC; $\delta = 2644$; $a = 1,27 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$).

В якості мастильного середовища, яке враховувалося трибологічними властивостями мастильного середовища E_y , застосовувалися:

- гідравлічна олива МГП – 10 ($E_y = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$);
- моторна олива М – 10Г_{2к} ($E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$);
- моторна олива ESSOULTRONSL/CF ($E_y = 7,2 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$).

Для визначення максимальних значень швидкості зношування під час перехідного процесу обґрунтовано метод АЕ і інформативний параметр – потужність сигналів АЕ.

Отримана залежність, яка встановлює лінійний взаємозв'язок між вимірною в процесі експерименту потужністю сигналів АЕ – W_{AE} і швидкістю роботи дисипації в трибосистемі – W_{mp} :

$$W_{mp} = 0,033 \cdot W_{AE}. \quad (1)$$

Залежність (1) дозволяє за вимірянй в процесі експерименту потужності АЕ – W_{AE} , розрахувати значення швидкості роботи дисипації в трибосистемі W_{mp} . Використовуючи отримане значення W_{mp} , можна розрахувати швидкість зношування в трибосистемі в довільний момент часу:

$$I_V = 6 \cdot 10^{-10} \exp(0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{\delta_p \cdot \delta_H}} \cdot W_{mp}), \frac{\text{м}^3}{\text{год}}, \quad (2)$$

де I_V – об'ємна швидкість зношування, $\text{м}^3/\text{год}$. в довільний момент часу;

δ_p і δ_H – коефіцієнти, які враховують реологічні властивості структури матеріалу у рухомого і нерухомого трибоелементів.

Експериментальним шляхом встановлено, що потужність АЕ корелює зі швидкістю зношування, коефіцієнт кореляції $R = 0,98$ і адекватно відображає процес припрацювання в будь-якій точці перехідного процесу.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений математичній моделі перехідних процесів в трибосистемах в умовах граничного навантаження.

Виконано структурну ідентифікацію трибосистеми як об'єкта моделювання процесу припрацювання. Отримано диференційні рівняння перехідного процесу для моделювання швидкості зношування (3) і коефіцієнта тертя (4):

$$T_I^2 \frac{d^2 I}{dt^2} + 2d_I T_I \frac{dI}{dt} + I + K_3 = K_1 T_2 \frac{d^2 W}{dt^2} + K_1 \frac{dW}{dt}, \quad (3)$$

$$T_f^2 \frac{d^2 f}{dt^2} + 2d_f T_f \frac{df}{dt} + f + \frac{f}{K_1 K_2} = \frac{T_2}{K_2} \frac{dW}{dt} + \frac{W}{K_2}, \quad (4)$$

де T_I, T_f – постійні часу трибосистеми, які враховують інерційні властивості змін швидкості зношування I та коефіцієнта тертя f , с;

d_I, d_f – декремент загасання коливань швидкості зношування I та коефіцієнта тертя f після завершення припрацювання;

K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти підсилення, які враховують, як сильно вхідний сигнал W впливає на вихідний – величину швидкості зношування, коефіцієнта тертя та здатність трибосистеми до припрацювання, безрозмірні величини;

W – потужність, яка підводиться до трибосистеми, визначається за виразом:

$$W = N \cdot v_{ков} = H \cdot \frac{M}{c} = Bm, \quad (5)$$

де N – навантаження на трибосистему, Н;

$v_{ков}$ – швидкість ковзання, м/с.

З аналізу рівнянь слідує, що на динаміку перехідного процесу впливає швидкість і прискорення наростання вхідного впливу (навантаження і швидкості ковзання). Показано, що характер протікання перехідного процесу залежить від коефіцієнтів підсилення і постійних часу, які входять в диференціальні рівняння, а відсутність або наявність коливань – від величини декремента загасання.

Вирази для розрахунку постійних часу T_1, T_2, T_I, T_f , а також коефіцієнтів підсилення K_1, K_2, K_3 наведені в дисертаційній роботі.

Визначено фізичний зміст коефіцієнтів підсилення і постійних часу. Коефіцієнт K_1 визначає чутливість трибосистеми до вхідного впливу, а отже, величину збільшення швидкості зношування і коефіцієнта тертя в процесі припрацювання. Коефіцієнти K_2, K_3 визначають здатність трибосистеми до припрацювання. Постійна часу T_1 – це час, який необхідно для стабілізації градієнта температур по об'єму трибоелементів з урахуванням їх температуропровідності. T_2 – це час, за який відбувається перебудова структури поверхневих шарів трибоелементів, процеси деформації і зміцнення.

Рішенням для наведених диференціальних рівнянь (3) та (4) є вирази:

$$I(t) = I_{cm} \left[K_1 e^{\frac{-d_I t}{T_I}} \cdot (\cos \nu_I t + A_I \sin \nu_I t) \right] + I_{cm}, \quad (6)$$

$$f(t) = f_{cm} \left[1 - e^{\frac{-d_f t}{T_f}} \cdot (\cos \nu_f t + A_f \sin \nu_f t) \right], \quad (7)$$

де I_{cm}, f_{cm} – сталі значення швидкості зношування та коефіцієнта тертя трибосистеми після завершення припрацювання;

ν_I, ν_f – частота коливань швидкості зношування та коефіцієнта тертя після завершення припрацювання;

A_I, A_f – величини відхилення швидкості зношування та коефіцієнта тертя від поточного значення під час коливального процесу;

t – час роботи трибосистеми, с.

За отриманими виразами (6) і (7) виконано експериментальну перевірку похибки моделювання. Експериментальним шляхом встановлено, що похибка моделювання швидкості зношування під час перехідного процесу складає 11,9 ... 16,6%, а коефіцієнта тертя – 13,0 ... 18,5%. Максимальна похибка моделювання отримана при зміні шорсткості поверхонь тертя.

Отримано залежності зміни часу припрацювання трибосистем від основних факторів, що впливають на перехідний процес: коефіцієнта форми K_ϕ ; навантаження N ; шорсткості поверхонь тертя Ra ; трибологічних властивостей мастильного середовища E_y ; реологічних властивостей структури сполучених матеріалів δ . За отриманими теоретичним і експериментальним значеннями отримано коефіцієнт варіації величини часу припрацювання різних трибосистем.

Виконано оцінку ступеня впливу факторів на час припрацювання трибосистем. За величиною коефіцієнта варіації встановлений рейтинг факторів в бік зменшення ступеня впливу: коефіцієнт форми трибосистеми; навантаження; шорсткість поверхонь тертя; трибологічні властивості мастильного середовища; реологічні властивості структури сполучених матеріалів. Даний рейтинг дозволить розробити практичні рекомендації щодо зменшення часу припрацювання трибосистем.

В четвертому розділі визначені критерії оцінки перехідних процесів в трибосистемах та виконано аналіз їх ступеня впливу на цей процес.

Отримало подальший розвиток визначення добротності трибосистеми:

$$Q = \frac{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y}{\dot{\epsilon}_{np}} \cdot \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж / м}^3. \quad (8)$$

Наведений вираз добротності трибосистеми, на відміну від відомого, враховує:

- геометричні розміри трибосистеми – K_ϕ , які впливають на час припрацювання;
- приведені значення температуропровідності матеріалів трибоелементів – a_{np} , яке впливає на рівень температурних напружень в поверхневих шарах;
- приведені значення швидкості поширення деформації в поверхневих шарах матеріалів трибоелементів – $\dot{\epsilon}_{np}$, яке впливає на ступінь релаксації напружень.

Перераховані відмінності впливають на час припрацювання трибосистем, а отже на динаміку перехідних процесів в трибосистемах, рис. 1а.

Як впливає з отриманих результатів, при певному значенні добротності $Q = 30 \cdot 10^{12}$ Дж/м³, час припрацювання за двома параметрами буде однаковим.

Представлені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок, що величина Q може виступати критерієм добротності трибосистем, тобто мірою потенційної можливості трибосистеми пристосовуватися (адаптуватися) до умов експлуатації, забезпечуючи максимальний ресурс та мінімальні втрати на тертя.

Коефіцієнт підсилення K_1 характеризує реакцію трибосистеми на вхідний сигнал (чутливість трибосистеми):

$$K_1 = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{\phi nk}}{Q} = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{\phi nk} \cdot \dot{\epsilon}_{np}}{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}}, \quad (9)$$

де $\sigma_{\phi nk}$ – напруження на плямах фактичного контакту, Па.

Ступінь впливу чутливості трибосистеми на час припрацювання представлено залежностями на рис. 1б. Як випливає з представлених результатів для параметра швидкості зношування існує оптимальні значення $K_1 = 3 \dots 4$. Подальше збільшення K_1 буде викликати збільшення часу припрацювання. При цьому, збільшення K_1 зменшує час припрацювання по параметру коефіцієнта тертя.

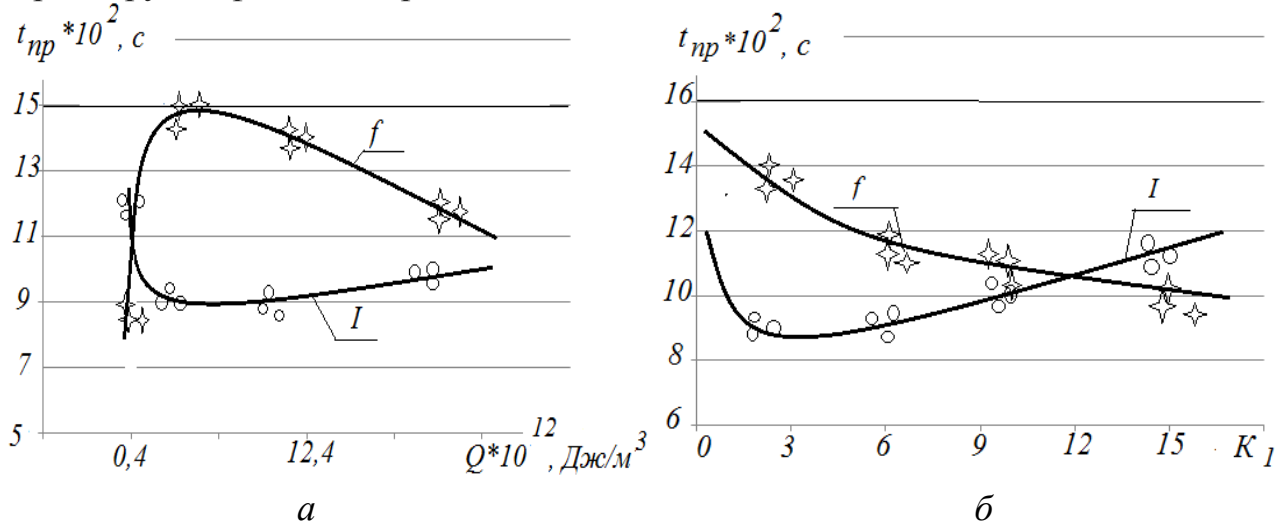


Рис. 1. Залежності зміни часу припрацювання: а) за параметрами швидкості зношування та коефіцієнта тертя від величини добротності трибосистем; б) по параметру швидкості зношування та коефіцієнту тертя від величини критерію чутливості трибосистеми K_1 .

Коефіцієнт підсилення K_2 характеризує здатність трибосистеми змінювати шорсткість і структуру поверхневих шарів при зміні зовнішніх умов:

$$K_2 = \frac{Q \cdot a_{np} \cdot d_{фнк}}{130 \cdot W_{тр}} = \frac{K_\phi^2 \cdot a_{np}^2 \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} \cdot d_{фнк}}{130 \cdot \dot{\epsilon}_{np} \cdot (W_{тр,p} + W_{тр,n})}, \quad (10)$$

де $d_{фнк}$ – діаметр плями фактичного контакту, м;

$W_{тр,p}$, $W_{тр,n}$ – швидкість роботи дисипації в рухомому та нерухомому трибоелементах, Дж/с.

Функціональний зв'язок коефіцієнта K_2 і часу припрацювання трибосистем представлено на рис. 2а. Поруч з теоретичними кривими наведені експериментальні точки для різних трибосистем, що мають різні значення K_2 . Відносна похибка моделювання $e_t = 8,4 \dots 9,5\%$.

На підставі отриманих залежностей можна зробити висновок, що коефіцієнт K_2 має мінімальні значення для вищих кінематичних пар. При переході до нижчих кінематичних спряжень відзначається незначне зростання часу припрацювання при збільшенні K_2 . Це можна пояснити збільшенням розмірів робочих площ тертя у рухомого і нерухомого трибоелементів. При цьому збільшення значення $K_2 > 250 \dots 300$ позитивного ефекту не приносить.

Постійна часу T_1 визначає час, який необхідно для зміни градієнта температур по всьому об'єму трибоелементів. Даний час визначається за виразом:

$$T_1 = \frac{9 \cdot \pi \left(\sqrt[3]{V_{np}} \right)^2}{a_{np}} = \frac{9 \cdot \pi V_{np}^{0,666}}{a_{np}}, c, \quad (11)$$

де V_{np} – приведений об'єм матеріалу трибосистеми, m^3 .

Результати моделювання, рис. 2б, були перевірені експериментально, де поруч з теоретичними кривими нанесені точки для трибосистем з різними значеннями T_1 . Відносна похибка моделювання $e_t = 8,4 \dots 9,1\%$.

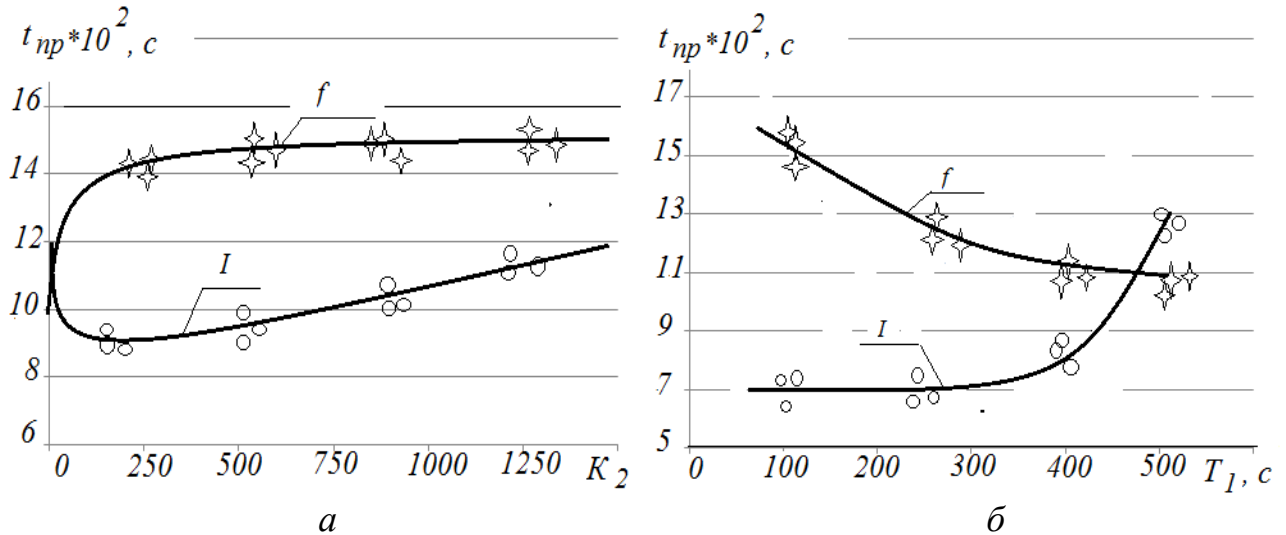


Рис. 2. Залежності зміни часу припрацювання трибосистем: а) по параметру швидкості зношування та коефіцієнту тертя від величини критерію припрацювання трибосистем K_2 ; б) від величини постійної часу T_1 .

Постійна часу T_2 визначає інерційні властивості зміни шорсткості поверхонь тертя і структури поверхневих шарів під час припрацювання або при зміні зовнішніх умов. Постійну часу для швидкості зношування запишемо у вигляді:

$$T_{2,I} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot K_{\phi} \cdot h_{\partial,np}}{\dot{\epsilon}_{np}}, c, \quad (12)$$

– для коефіцієнта тертя:

$$T_{2,f} = \frac{7,5 \cdot 10^8 \cdot K_{\phi} \cdot h_{\partial,np}}{\dot{\epsilon}_{np}}, c, \quad (13)$$

де $h_{\partial,np}$ – приведена глибина деформації матеріалу трибосистеми, m^3 .

Функціональна залежність між часом припрацювання і величиною $T_{2,I}$ та $T_{2,f}$ представлена на рис. 3а. Як впливає з отриманих кривих, чим менше значення $T_{2,I}$ та $T_{2,f}$, тим менше час припрацювання трибосистем. При цьому процес припрацювання за параметром швидкості зношування має менший час, ніж за параметром коефіцієнта тертя.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити висновок, що постійні часу $T_{2,I}$ і $T_{2,f}$ можуть виступати як критерії інерційності трибосистеми, які характеризують зміну (адаптацію) структури поверхневих шарів при зміні навантаження або швидкості ковзання під час припрацювання. Чим менше значення критеріїв $T_{2,I}$ і $T_{2,f}$, тим швидше відбувається формування рівноважної шорсткості поверхонь тертя і зміни структури поверхневих шарів.

Наявність або відсутність коливань в динамічних системах визначається величиною декременту загасання, вираз якого отримано при отриманні диференційних рівнянь (3) і (4):

для швидкості зношування під час припрацювання:

$$d_I = \frac{T_1 + T_2 + K_1 \cdot K_2}{3,2 \cdot T_I} \quad (14)$$

для коефіцієнта тертя під час припрацювання:

$$d_f = \frac{T_1 + T_{2f}}{3 \cdot T_f \cdot K_1 \cdot K_2} \quad (15)$$

Функціональний взаємозв'язок між часом припрацювання і величинами декрементів загасання за швидкістю зношування d_I та коефіцієнту тертя d_f , представлено на рис. 3б.

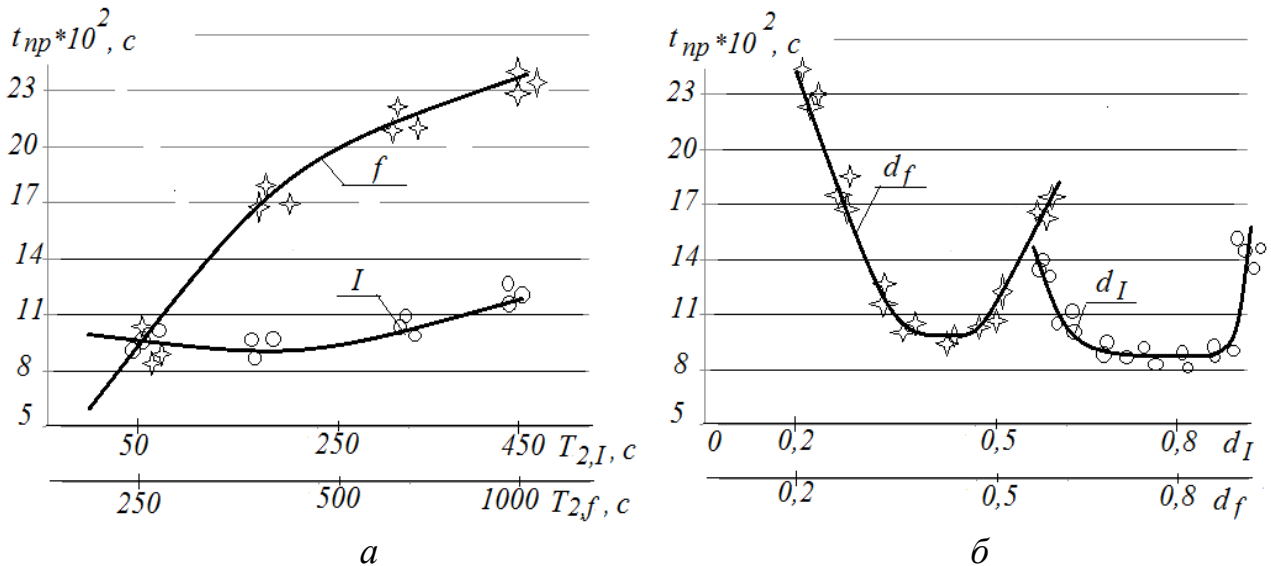


Рис. 3. Залежності зміни часу припрацювання: а) від величини постійних часу $T_{2,I}$ та $T_{2,f}$; б) від величини декрементів загасання d_I та d_f .

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити висновок, що декременти загасання за параметром швидкості зношування d_I та за параметром коефіцієнта тертя d_f можуть виступати як безрозмірні величини стаціонарності перехідних процесів в трибосистемах. Для зменшення часу припрацювання трибосистем необхідно забезпечувати оптимальне значення декрементів загасання: $d_I = 0,7 \dots 0,95$; $d_f = 0,35 \dots 0,45$.

Змінюючи такі параметри, як швидкість ковзання, навантаження, мастильне середовище, можна змінювати значення декрементів загасання, а отже, управляти процесом припрацювання.

У п'ятому розділі наведені результати обґрунтування раціональної програми припрацювання трибосистем.

Аналіз робіт, присвячених процесам припрацювання трибосистем, дозволяє зробити висновок, що мінімальний час припрацювання забезпечується на режимі «на грані заїдання», коли енергія активації становить приблизно 90% від енергії задира або схоплювання.

Енергію активації або потужність, яка підводиться до трибосистеми, можна визначити виразом (5).

Отже, першою складовою програми припрацювання є виконання умови $W = \text{const}$. При цьому величина W не повинна перевищувати 90% енергії активації, яка призведе до задиру поверхонь тертя трибосистеми.

Другою складовою програми є те, що змінюючи обернено пропорційні величини навантаження N і швидкості ковзання $v_{ков}$ (забезпечуючи $W = \text{const}$), процесом припрацювання можна управляти. Це впливає з висновків четвертого розділу даної роботи.

Для зниження чутливості трибосистеми до задиру необхідно зменшувати критерій K_1 . Одним з ефективних шляхів зменшення K_1 – це зменшення швидкості ковзання, що впливає з висновків четвертого розділу.

Одночасно з формуванням рівноважної шорсткості поверхонь тертя йде процес перебудови структури поверхневих шарів з утворенням окисних плівок і вторинних структур, який оцінюється критерієм припрацювання K_2 . Одним із шляхів підвищення критерію припрацювання є зменшення швидкості ковзання, це впливає з висновків четвертого розділу. На підставі виконаного обґрунтування запишемо перший режим програми припрацювання:

$$N = \text{max}; \quad v_{ков} = \text{min}, \quad \text{при } W = \text{const} \quad (16)$$

Після формування рівноважної шорсткості на поверхнях тертя необхідний перехід до другого режиму припрацювання. Призначення другого режиму – зменшити інерційність перехідних процесів в поверхневих шарах, тобто завершити формування структури поверхневих шарів (збільшення твердості, утворення вторинних структур і окисних плівок) за мінімальний час. Одним із шляхів зниження критеріїв інерційності трибосистем, згідно висновків четвертого розділу, є збільшення швидкості ковзання. На підставі наведеного обґрунтування запишемо другий режим програми припрацювання:

$$N = \text{min}; \quad v_{ков} = \text{max}, \quad \text{при } W = \text{const} \quad (17)$$

Час завершення першого режиму програми, а також другого режиму визначається за результатами моделювання. При цьому визначаються наступні значення: максимальне значення величини швидкості зношування I_{max} і коефіцієнта тертя f_{max} під час припрацювання; сталі значення швидкості зношування I_{cm} і коефіцієнта тертя f_{cm} після завершення припрацювання; час припрацювання за параметрами швидкості зношування і коефіцієнту тертя t_{np} і величини лінійного зносу за час припрацювання U .

Для моделювання процесу припрацювання виберемо трибосистему сталь 40X + Бр. АЖ 9-4. Мастильне середовище – моторна олива $M - 10\Gamma_2\kappa$, трибологічні властивості $E_v = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³.

Перший режим припрацювання запишемо згідно формули (16):

$$W_1 = 2600 \cdot 0,2 = 520 \text{ Bm} . \quad (18)$$

Другий режим припрацювання запишемо згідно формули (17):

$$W_2 = 650 \cdot 0,8 = 520 \text{ Bm} . \quad (19)$$

Виберемо третій режим припрацювання – експлуатаційний режим:

$$W_3 = 1040 \cdot 0,5 = 520 \text{ Bm} . \quad (20)$$

Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми за параметром швидкості зношування представлені на рис. 4, а за параметром коефіцієнта тертя, на рис. 5. Номер кривої позначає номер режиму, а час: t_1 ; t_2 ; t_3 – час припрацювання на кожному з режимів.

Величини зносу за припрацювання U_1 ; U_2 ; U_3 визначимо, як площу під відповідною кривою.

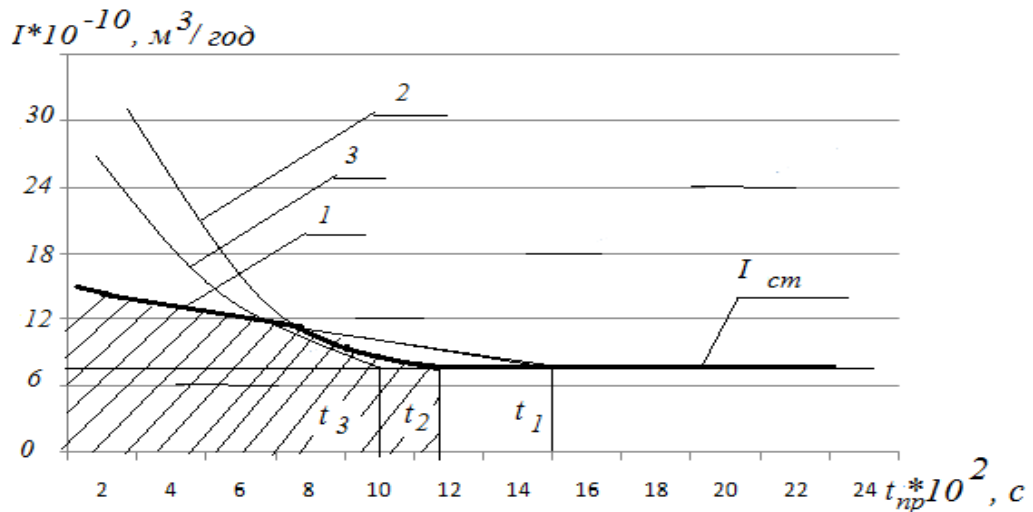


Рис. 4. Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X+Бр.АЖ 9-4 за параметром швидкості зношування: режим 1 – режим 2

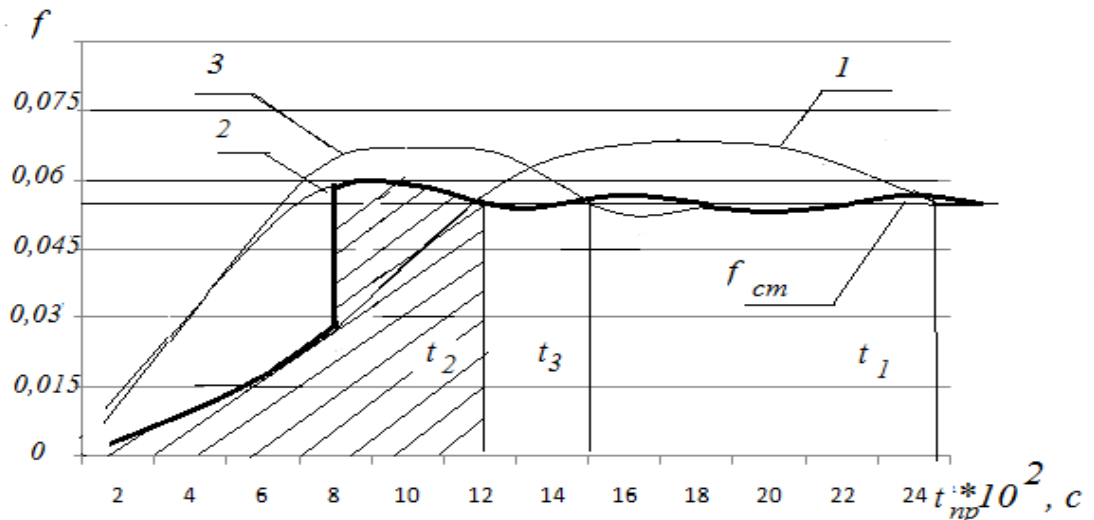


Рис. 5. Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9-4 за параметром коефіцієнта тертя: режим 1 – режим 2

Аналіз перехідних кривих на рис. 4 дозволяє зробити висновок, що максимальний знос за припрацювання $U_2 = 1,199$ мкм буде при застосуванні другого режиму: $N = 650$ Н; $v_{ков} = 0,8$ м/с; при цьому час припрацювання має середнє значення з трьох режимів, рівне $t_2 = 1100$ с.

Знос за припрацювання за першим режимом складає $U_1 = 0,988$ мкм, а $t_1 = 1400$ с. Знос за припрацювання за третім режимом $U_3 = 0,905$ мкм, $t_3 = 900$ с.

Аналіз перехідних кривих коефіцієнта тертя, рис. 5, дозволяє зробити висновок, що мінімальне відхилення від сталого значення та мінімальний час припрацювання характерні для другого режиму $t_2 = 1100$ с.

Перехідний процес за коефіцієнтом тертя на першому режимі: $N = 2600$ Н; $v_{ков} = 0,2$ м/с; має найбільший час припрацювання $t_1 = 2400$ с і найбільше відхилення $f_{max} = 0,065$ від сталого значення $f_{cm} = 0,054$.

Спільний аналіз, наведений на рис. 4 та рис. 5 режимів припрацювання, дозволяє обґрунтувати програму припрацювання трибосистеми при виконанні умов: $U \rightarrow \min, t_{np} \rightarrow \min$. Згідно рис. 4 припрацювання необхідно починати на першому режимі: $N = 2600$ Н; $v_{ков} = 0,2$ м/с. При досягненні часу $t_{np} = 700$ с, коли відбувається перетин кривих 1 і 2, необхідно перейти на другий режим: $N = 650$ Н; $v_{ков} = 0,8$ м/с. Перехідна характеристика такої програми позначена на рис. 4 жирною лінією. Сумарний знос за припрацювання (площа під жирною кривою) складе $U = 0,840$ мкм, а період припрацювання $t_{np} = 1100$ с.

Для порівняння розглянемо зворотну програму припрацювання (друга програма), де режими навантаження застосовуємо в зворотному порядку, рис. 6 та рис. 7. Аналіз кривих на рис. 6 дозволяє зробити висновок, що початок припрацювання по другому режиму, крива 2, а потім перехід на перетин з кривою 1 на перший режим, призведе до найбільшого зносу за припрацювання $U = 1,560$ мкм, а час припрацювання дорівнює 1400 с. При такій програмі період припрацювання до стабілізації коефіцієнта тертя, рис.7, складе 2400 с. Така програма припрацювання зображена на рис. 6 та рис. 7 жирною пунктирною лінією.

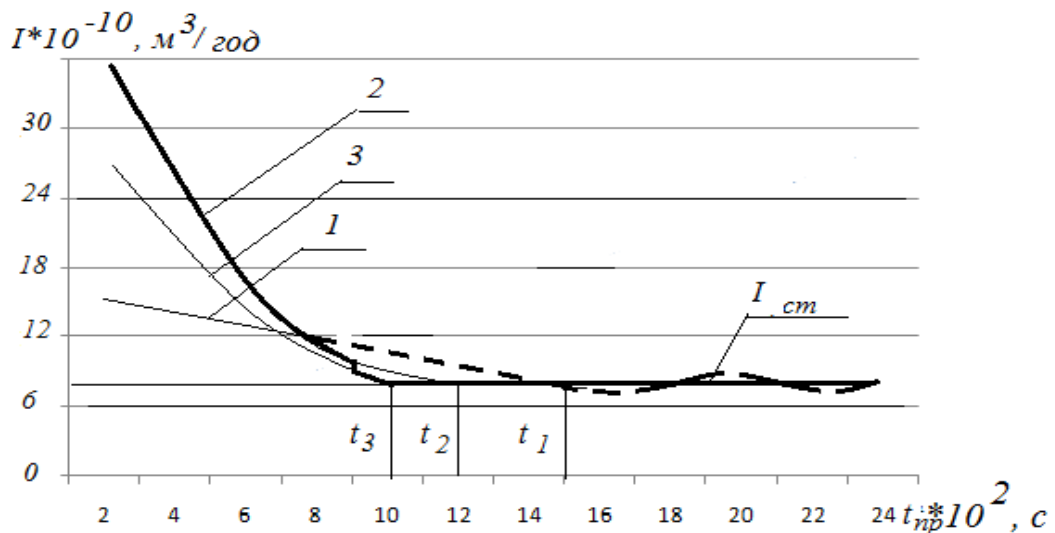


Рис. 6. Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9-4 за параметром швидкості зношування при застосуванні програми: режим 2 – режим 1

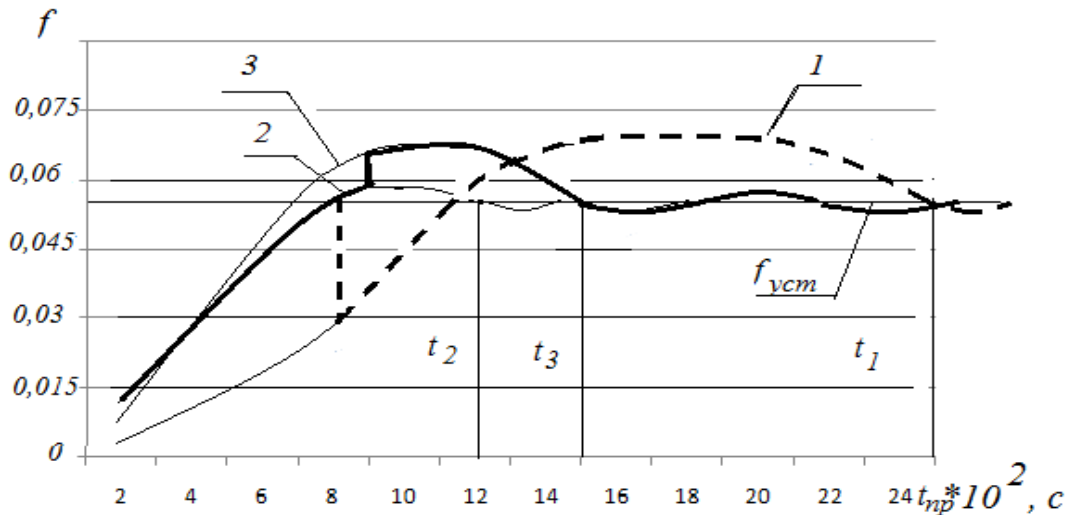


Рис. 7. Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9-4 за параметром коефіцієнту тертя при застосуванні програми: режим 2 – режим 1

За результатами моделювання можна зробити висновок, що програма припрацювання: режим 2 – режим 1, не є раціональною, тому що призводить до максимального зносу за припрацювання $U = 1,560$ мкм та максимального часу припрацювання $t_{np} = 2400$ с.

Отримані результати моделювання були підтверджені експериментально, що наведено в п'ятому розділі роботи.

На підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів розроблена програма обкатки шестеренних насосів НШ-10 на стенді після їх виготовлення. Ефективність розробленої програми підтверджена стендовими випробуваннями і дозволяє стверджувати, що при однаковому лінійному зносі час обкатки зменшується в 2,66 разів порівняно з базовою програмою, яка застосовується на заводі – виробнику.

Виконано оцінку економічного ефекту від впровадження розробленої програми обкатки насосів на заводі – виробнику. Річний економічний ефект за рахунок скорочення часу обкатки насосів на стенді за програмою 1200 шт. в рік складе 424300 грн. / рік.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі – розробка методів моделювання перехідних процесів в трибосистемах на етапі проектування та виробництва нових машин. Результати моделювання дають можливість спрогнозувати ресурс і вибрати раціональні режими обкатки і експлуатації.

1. Аналіз публікацій, присвячених моделюванню процесів тертя та зношування в трибосистемах машин, а також методам та методикам розрахунку і прогнозування ресурсу, показав, що моделюванню перехідних процесів приділено недостатню увагу. В основному в роботах розглядаються стаціонарні режими. При цьому, з аналізу робіт слідує, що знос за припрацювання

відповідає зносу за період експлуатації. Тому облік величини зносу за час припрацювання є необхідною ланкою в методиках і методах розрахунку на зносостійкість на етапі проектування та обкатки нових машин.

2. Для визначення максимальних значень швидкості зношування під час перехідного процесу обґрунтовано метод акустичної емісії (АЕ) і інформативний параметр – потужність сигналів АЕ. Експериментальним шляхом встановлено, що потужність АЕ корелює зі швидкістю зношування, коефіцієнт кореляції $R = 0,98$ і адекватно відображає процес припрацювання. Отримано залежності, які дозволяють визначати швидкість роботи дисипації в трибосистемах під час перехідного процесу за значеннями потужності сигналів акустичної емісії, що дозволило визначити величини швидкості зношування під час припрацювання в будь-якій точці перехідного процесу.

3. Виконано структурну та параметричну ідентифікацію трибосистеми як об'єкта моделювання процесу припрацювання. Отримано диференційні рівняння перехідного процесу для моделювання швидкості зношування і коефіцієнта тертя. Встановлено, що перехідні процеси в трибосистемах описуються диференційними рівняннями другого порядку. З аналізу рівнянь слідує, що на динаміку перехідного процесу впливає швидкість і прискорення наростання вхідного впливу (навантаження і швидкості ковзання). Показано, що характер протікання перехідного процесу залежить від коефіцієнтів підсилення і постійних часу, які входять в диференційні рівняння, а відсутність або наявність коливань – від величини декременту загасання. Отримано вирази для визначення коефіцієнтів підсилення і постійних часу. Показано, що після їх підстановки в розв'язання диференційних рівнянь можна моделювати процеси зміни швидкості зношування і коефіцієнта тертя під час припрацювання.

4. Отримано теоретичні залежності зміни часу припрацювання трибосистем від основних факторів, що впливають на перехідний процес: коефіцієнта форми; навантаження; шорсткості поверхонь; трибологічних властивостей мастильного середовища; реологічних властивостей структури сполучених матеріалів. За отриманими теоретичним і експериментальним значеннями отримано коефіцієнт варіації величини часу припрацювання різних трибосистем. Виконано експериментальну перевірку похибки моделювання. За результатами моделювання проведена корекція коефіцієнтів підсилення, постійних часу і декрементів загасання коливань. Експериментальним шляхом встановлено, що похибка моделювання швидкості зношування під час перехідного процесу складає 11,9 ... 16,6%, а коефіцієнта тертя 13,0 ... 18,5%.

5. Отримало подальший розвиток визначення добротності трибосистеми, теоретичними і експериментальними дослідженнями встановлено взаємозв'язок між величиною добротності, швидкістю зношування і коефіцієнтом тертя в процесі припрацювання. Показано, що збільшення добротності знижує зазначені вище параметри, а сам критерій є мірою потенційної можливості трибосистеми пристосовуватися (адаптуватися) до умов експлуатації. Встановлено взаємозв'язок між часом припрацювання і величиною добротності. Показано, що процесом припрацювання можна управляти.

6. Теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджені критерії оцінки процесу припрацювання трибосистем в умовах граничного мащення:

добротності Q ; чутливості до зовнішніх впливів K_1 ; припрацювання K_2 ; інерційності при зміні зовнішніх впливів T_1 та T_2 ; стаціонарності d_1 , d_f . Обґрунтовано шляхи вибору раціональних значень критеріїв та зроблено висновок про необхідність розробки ступінчастої програми припрацювання, де швидкість ковзання і навантаження повинні змінюватися обернено пропорційно.

7. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблена і обґрунтована структура програми припрацювання трибосистем, яка складається з двох режимів. На першому режимі задається максимальне навантаження, нижче навантаження «заїдання» при мінімальній швидкості ковзання. Такий режим дозволяє за рахунок інтенсивної деформації мікроступів сформуванню рівноважну шорсткість поверхонь тертя і змінити структуру тонких поверхневих шарів. На другому режимі задається мінімальне навантаження і максимальна швидкість ковзання. Такий режим дозволяє зменшити час перебудови структури матеріалу поверхневих шарів і завершити утворення вторинних структур і окисних плівок. Теоретичним шляхом за допомогою математичного моделювання для різних конструкцій трибосистем отримано підтвердження ефективності розробленої програми припрацювання, яка в порівнянні з іншими відомими програмами скорочує час припрацювання і лінійний знос за припрацювання. Експериментальна перевірка розробленої програми на різних конструкціях трибосистем дозволила встановити ефективність режимів припрацювання і розрахувати похибку моделювання процесу припрацювання, яка не перевищила 14,2%.

8. На підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів розроблена програма обкатки шестеренних насосів НШ-10 на стенді після їх виготовлення. Ефективність розробленої програми підтверджена стендовими випробуваннями і дозволяє стверджувати, що при однаковому лінійному зносі, час обкатки зменшується в 2,66 разів порівняно з базовою програмою, яка застосовується на заводі – виробнику. Виконано оцінку економічного ефекту від впровадження розробленої програми обкатки насосів на заводі – виробнику. Річний економічний ефект за рахунок скорочення часу обкатки насосів на стенді за програмою 1200 шт. в рік складе 424300 грн. / рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Бекиров А.Ш. Структурная идентификация математической модели переходных процессов в трибосистемах. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 7. С. 109–119.
2. Бекиров А.Ш. Параметрическая идентификация математической модели переходных процессов в трибосистемах. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 8. С. 167–176.
3. Войтов В.А., Бекиров А.Ш. Математическая модель переходных процессов в трибосистемах и результаты моделирования. *Проблеми трибології*. 2018. № 1. С. 18–27.

4. Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В. Критерий оценки добротности трибосистемы и его связь с трибологическими характеристиками. *Проблеми трибології*. 2018. № 2. С. 35–41.

5. Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В. Обоснование критериев оценки чувствительности и прирабатываемости трибосистем. *Проблеми трибології*. 2018. № 3. С. 17–22.

6. Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В. Обоснование критериев оценки инерционности трибосистем. *Проблеми трибології*. 2018. № 4. С. 6–13.

7. Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В. Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для визначення швидкості зношування трибосистем на перехідних режимах. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 15. С. 190–202.

Статті у закордонних виданнях

8. Viktor Vojtov, Abliatif Biekirov, Anton Voitov. The Quality of the Tribosystem as a Factor of Wear Resistance / International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol 7, -No 4.3 Special issue 3, pp. 25-29. (в базі SCOPUS).

9. Vojtov V. A., Biekirov A. Sh., Voitov A. V., Tsymbal B. M. Running-in Procedures and Performance Tests for Tribosystems. *Journal of Friction and Wear, Allerton Press*. 2019, Vol. 40, No. 5, pp. 376–383. Russian Text The Author(s), 2019, published in *Trenie i Iznos*, 2019, Vol. 40, No. 5, pp. 493–503. (в базі SCOPUS).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Войтов В.А., Бекиров А.Ш. Методический подход к разработке математической модели переходных процессов в трибосистемах машин. *XIII Міжнародна науково-практична конференція “Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy”*. Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2017. С. 25–27.

2. Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В. Обоснование программы приработки трибосистем. *Матеріали VI-ої Міжнародної конференції “Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій”, 13 - 15 вересня 2018 року: збірник наукових праць. Частина 1. Вінницький національний технічний університет [та ін.]*. – Вінниця: ВНТУ, 2018. С.57.

3. Войтов А.В., Бекиров А.Ш. Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для визначення швидкості зношування трибосистеми на перехідних режимах. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції “Деревооброблювальні технології та систематехніка лісового комплексу”* – Харків: ХНТУСГ, 2019. С. 36.

АНОТАЦІЯ

Бекіров А.Ш. Моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.04 «Гертя та зношування в машинах» (131 – Прикладна механіка). – Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка Україна, Харків, 2020.

Представлено структурну та параметричну ідентифікацію трибосистеми як об'єкта моделювання процесу припрацювання. Отримано диференційні рівняння перехідного процесу для моделювання швидкості зношування і коефіцієнта тертя. Отримано теоретичні залежності зміни часу припрацювання трибосистем від основних факторів, що впливають на перехідний процес.

Отримало подальший розвиток визначення добротності трибосистеми, теоретичними і експериментальними дослідженнями встановлено взаємозв'язок між величиною добротності, швидкістю зношування і коефіцієнтом тертя в процесі припрацювання, а сам критерій є мірою потенційної можливості трибосистеми пристосовуватися (адаптуватися) до умов експлуатації. Встановлено взаємозв'язок між часом припрацювання і величиною добротності. Показано, що процесом припрацювання можна управляти. Обґрунтовано та розроблено раціональну програму припрацювання трибосистем.

Ключові слова: трибосистема; швидкість зношування; сила тертя; моделювання процесів тертя та зношування; перехідні режими; добротність трибосистеми; припрацювання трибосистем; програма припрацювання.

АННОТАЦИЯ

Бекиров А.Ш. Моделирование переходных процессов в трибосистемах машин и обоснование эффективной программы их приработки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах» (131 – Прикладная механика). – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко Украина, Харьков, 2020.

Представлена структурная и параметрическая идентификация трибосистемы как объекта моделирования процесса приработки. Получены дифференциальные уравнения переходного процесса для моделирования скорости изнашивания и коэффициента трения. Получены теоретические зависимости изменения времени приработки трибосистем от основных факторов, влияющих на переходный процесс: коэффициента формы; нагрузки; шероховатости поверхностей; трибологических свойств смазочной среды; реологических свойств структуры сопряженных материалов. По полученным теоретическим и экспериментальным значениям рассчитан коэффициент вариации величины времени приработки различных трибосистем. Выполнена экспериментальная проверка погрешности моделирования. По результатам моделирования проведена коррекция коэффициентов усиления, постоянных времени и декрементов затухания колебаний. Экспериментальным путем установлено, что погрешность моделирования скорости изнашивания во время переходного процесса составляет 11,9 ... 16,6%, а коэффициента трения 13,0 ... 18,5%.

Получило дальнейшее развитие определение добротности трибосистемы, теоретическими и экспериментальными исследованиями установлена взаимосвязь между величиной добротности, скоростью изнашивания и коэффициентом трения в процессе приработки, а сам критерий является мерой потенциальной возможности трибосистемы приспособиваться

(адаптироваться) к условиям эксплуатации. Установлена взаимосвязь между временем приработки и величиной добротности. Показано, что процессом приработки можно управлять.

Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены критерии оценки процесса приработки трибосистем в условиях граничной смазки: добротности; чувствительности к внешним воздействиям; приработки; инерционности при изменении внешних воздействий; стационарности. Обоснованы пути выбора рациональных значений критериев и сделан вывод о необходимости разработки ступенчатой программы приработки, где скорость скольжения и нагрузка должны изменяться обратно пропорционально.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана и обоснована структура программы приработки трибосистем, состоящая из двух режимов. На первом режиме задается максимальная нагрузка, ниже нагрузки «заедания» при минимальной скорости скольжения. На втором режиме задается минимальная нагрузка и максимальной скорости скольжения.

Ключевые слова: трибосистема; скорость изнашивания; сила трения; моделирование процессов трения и изнашивания; переходные режимы; добротность трибосистемы; приработка трибосистем; программа приработки.

ABSTRACT

Biekiriv A.Sh. Simulation of transients in machine tribosystems and substantiation of effective program of their development. – On the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering (Doctor of Philosophy) in the specialty 05.02.04 «Rubbing and wearing in machines» (131 – Applied mechanics). – Kharkiv National Technical University of Agriculture. P. Vasylenko Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is directed to development of methods of modeling of transients in tribosystems at a stage of designing of new machines.

Structural and parametric identification of tribosystem as an object of simulation of the preparation process is presented. Transient differential equations for the wear rate and friction coefficient are obtained. Theoretical dependences of change of tribosystems working time on the main factors influencing the transition process are obtained.

Further development of determination of the figure of merit of the tribosystem was obtained, theoretical and experimental studies established the relationship between the value of the figure of merit, the rate of wear and the coefficient of friction in the process of harvesting, and the criterion itself is a measure of the potential ability of the tribosystem to adapt. The correlation between the working time and the figure of quality was established. It is shown that the process of working can be controlled. A rational program of tribosystem development has been substantiated and developed.

Key words: tribosystems; wear rate; friction force; modeling of friction and wear processes; transitional modes; the virtue of tribosystem; working out tribosystems; working program.