

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БЕКІРОВ АБЛЯТІФ ШЕВКЕТОВИЧ

УДК 621.891

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.02.04 – Тертя та зношування в машинах

131 – Прикладна механіка

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

А.Ш. Бекіров

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Войтов Віктор Анатолійович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Бекіров А.Ш. Моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Робота виконувалась у відповідності до плану науково-дослідних робіт навчально-наукового інституту технічного сервісу ХНТУСГ ім. П. Василенка «Розробка біоолив на базі рослинних олій олеїнового типу та дослідження процесів, які відбуваються в мастильному шарі з урахуванням властивостей матеріалів трибосистем», ДР 0110U001958.

Мета і завдання дослідження. 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.

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 експеримента, 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.

Представлено 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 рішення диференційних рівнянь можна моделювати процеси зміни швидкості зношування і коефіцієнта тертя під час припрацювання.

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%.

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.

Теоретично обґрунтовані й експериментально підтверджені 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 зроблено висновок про необхідність розробки ступінчастої програми припрацювання, де швидкість ковзання і навантаження повинні змінюватися обернено пропорційно.

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. На другому режимі задається мінімальне навантаження і максимальна швидкість ковзання.

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%.

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.

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 диференціальні 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_t , d_f . Обґрунтовано шляхи вибору раціональних значень критеріїв та необхідність застосування ступінчастої програми припрацювання, де швидкість ковзання і навантаження повинні змінюватися обернено пропорційно.

Практична значимість 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.

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

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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., Бекіров 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.

8. Viktor Vojtov, Ablatif 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 інші.]*. – Вінниця: ВНТУ, 2018. С. 57.

3. Войтов А.В., Бекіров 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.

SUMMARY

Biekirov A. Sh. Simulation of transients in machine tribosystems and substantiation of effective program of their development. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences (PhD) in specialty 05.02.04 «Friction and wear in machines» (131 – Applied mechanics). – Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasylenko Ukraine, Kharkiv, 2020.

The work was carried out in accordance with the plan of research works of the Technical Service Institute KhNTUA named after P. Vasylenko «Development of bio-oils based on vegetable oils of oleic type and study of processes that occur in the lubricating layer taking into account the properties of tribosystem materials», DR 0110U001958.

The purpose and objectives of the study. The purpose of this work is to study transients in tribosystems, theoretical substantiation and experimental confirmation of the informativeness of the criteria for the evaluation of transients and the development of a program for effective elaboration of different tribosystem structures.

Object of research - processes of friction and wear during tribosystems working under boundary lubrication conditions.

Subject of research - modeling of transients in machine tribosystems and substantiation of effective program of their elaboration.

Research methods. Theoretical researches were based on system analysis, mechanics of contact interaction of friction surfaces, thermodynamics of irreversible processes in mechanical systems. Experimental studies were based on the theory of experiment planning, mathematical statistics. Laboratory investigations were performed according to methods and techniques in accordance with standards and regulatory technical documentation.

The results of the experiments were processed using standard computer programs based on mathematical statistics.

Structural and parametric identification of tribosystem as an object of simulation of the preparation process is presented. Transient differential equations were obtained to model wear rate and friction coefficient. It is established that transients in tribosystems are described by second-order differential equations. From the analysis of equations it follows that the dynamics of the transition process is influenced by the speed and acceleration of the increase of the input influence (load and sliding speed). It is shown that the nature of the transition process depends on the gain and time constants, which are included in differential equations, and the absence or presence of oscillations, from the magnitude of the damping decrement. Expressions were obtained to determine the gain and time constants. It is shown that after their substitution in the solution of differential equations it is possible to simulate the processes of change of the wear rate and the friction coefficient during processing.

Theoretical dependences of change of tribosystems' working time on the main factors influencing the transition process are obtained: form factor; load; surface roughness; tribological properties of lubricating medium; rheological properties of the structure of the combined materials. According to the theoretical and experimental values obtained the coefficient of variation of the magnitude of the time of working of different tribosystems. Experimental verification of simulation error. According to the simulation results, the correction of the gain, time constants and damping decreases. It was experimentally found that the error of the wear rate simulation during the transition is 11,9 ... 16,6%, and the coefficient of friction 13,0 ... 18,5%.

Further development of the 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 working. It is shown that increasing the figure of merit reduces the above parameters, and the criterion itself is a measure of the potential of the tribosystem to adapt to the operating conditions. The

correlation between the time of working and the value of quality is established. It has been shown that the rework process can be controlled.

Criteria for estimation of tribosystems' working process under boundary lubrication conditions are theoretically substantiated and experimentally confirmed: the quality factor Q ; sensitivity to external influences K_1 ; working out K_2 ; inertia when changing external influences T_1 and T_2 ; stationarity d_1 , d_f . The ways of choosing the rational values of the criteria are substantiated and the conclusion is drawn about the necessity of developing a step-by-step program of working where the speed of sliding and loading should vary inversely.

On the basis of theoretical and experimental researches, the structure of the tribosystem development program is developed and substantiated, which consists of two modes. In the first mode, the maximum load is set, below the load "jamming" at the minimum speed of sliding. The second mode sets the minimum load and maximum sliding speed.

Theoretical way with the help of mathematical modeling for different tribosystems constructions, we obtained confirmation of the effectiveness of the developed working program, which, in comparison with other known programs, reduces the working time and linear wear for working out. Experimental verification of the developed program on different tribosystem designs allowed us to establish the efficiency of the working modes and to calculate the error of the modeling of the working-in process, which did not exceed 14,2 %.

Based on theoretical and experimental results, a gear pump program was developed GP-10 on the stand after their manufacture. The effectiveness of the developed program is confirmed by bench tests and allows to state that with the same linear wear, the running time is reduced in 2,66 times compared to the base program used at the factory. The economic impact of the implementation of the developed program of running of pumps at the factory - manufacturer is made. Annual economic effect by reducing the running time of the pumps on the stand by 1200 pcs. per year, will be 424300 UAH / year.

Scientific novelty of the obtained results. Provisions characterizing the scientific novelty of the dissertation are as follows.

For the first time:

- transient dependencies in different tribosystem designs are obtained. It is shown that the nature of the working-out process depends on the gain and time constants that are included in the differential equations, and the absence or presence of oscillations on the magnitude of the damping decrement. Expressions were obtained to determine the gain and time constants;

- dependences of change of tribosystems working time on the main factors influencing the transition process are obtained: form factor; load; surface roughness; tribological properties of lubricating medium; rheological properties of the structure of the combined materials. According to the theoretical and experimental values obtained the coefficient of variation of the magnitude of the working time of different tribosystem structures.

It was further developed:

- determination of the figure of merit tribosystem, the relationship between the value of the figure of merit, the wear rate and the coefficient of friction during the working. It is shown that increasing the figure of merit decreases the above parameters, and the criterion itself is a measure of the potential of the tribosystem to adapt to the operating conditions.

Improved:

- criteria for evaluating the process of tribosystems working under boundary lubrication conditions: the quality factor Q ; sensitivity to external influences K_1 ; working out K_2 ; inertia when changing external influences T_1 and T_2 ; stationarity d_1 , d_f . The ways of choosing the rational values of the criteria and the necessity of applying a step-by-step program where the speed of sliding and loading should vary in inverse proportion.

The practical significance of the results obtained:

- The structure of the tribosystem development program has been developed, which consists of two modes. In the first mode, the maximum load is

set, below the load "jamming" at the minimum speed of sliding. The second mode sets the minimum load and maximum sliding speed. Experimental verification of the developed program on different tribosystem designs allowed us to establish the efficiency of the working modes and to calculate the error of the modeling of the working-in process, which did not exceed 14,2%;

- gear pumping program was developed GP-10 on the stand after their manufacture. The effectiveness of the developed program is confirmed by bench tests and allows to state that with the same linear wear, the running time is reduced in 2,66 times compared to the base program used at the factory.

- the economic impact of the implementation of the developed program of running of pumps at the factory - manufacturer. Annual economic effect by reducing the running time of the pumps on the stand under the program 1200 шт. per year, will be 424300 UAH / year.

The results of the work are accepted for use in «State Enterprise Kharkiv Aggregate Design Bureau» at the stage of designing and running of hydraulic machines.

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

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE THESIS

List of publications in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Biekirov A. Sh. Strukturnaya ydentyfikatsyya matematycheskoy modely perekhodnykh protsessov v trybosystemakh. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. 2017. № 7. S. 109–119.

2. Biekirov A. Sh. Parametrycheskaya ydentyfikatsyya matematycheskoy modely perekhodnykh protsessov v trybosystemakh. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. 2017. № 8. S. 167–176.

3. Vojtov V.A., Biekirov A. Sh. Matematicheskaya model' perekhodnykh protsessov v tribosistemakh i rezultaty modelirovaniya. *Problemi tribologii*. 2018. № 1. S. 18–27.

4. Vojtov V.A., Biekirov A. Sh., Voitov A.V. Kriteriy otsenki dobrotnosti tribosistemy i yego svyaz s tribologicheskimi kharakteristikami. *Problemi tribologii*. 2018. T. 88. № 2. S. 35–41.

5. Vojtov V.A., Biekirov A. Sh., Voitov A.V. Obosnovaniye kriteriyev otsenki chuvstvitel'nosti i prirabatyvayemosti tribosistem. *Problemi tribologii*. 2018. T. 89. № 3. S. 17–22.

6. Vojtov V.A., Biekirov A. Sh., Voitov A.V. Obosnovaniye kriteriyev otsenki inertsionnosti tribosistem. *Problemi tribologii*. 2018. № 4. S. 6–13.

7. Vojtov V.A., Biekirov A. Sh., Voitov A.V. Vybir informatyvnykh parametriv akustychnoyi emisiyi dlya vyznachennya shvydkosti znoshuvannya trybosystem na perekhidnykh rezhymakh. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. 2019. № 15. C. 190–202.

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. (base 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. (base SCOPUS).

Works certifying the approbation of dissertation materials:

1. Vojtov V. A., Biekirov A. Sh. Metodycheskyy pokhod k razrabotke matematycheskoy modely perekhodnykh protsessov v trybosistemakh mashyn. *XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya "Ratsionalne vykorystannya enerhiyi v tekhnitsi. TechEnergy"*. Kiev: Natsionalnyy universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy, 2017. S. 25–27.

2. Vojtov V. A., Biekirov A. Sh., Voitov A. V. Obosnovanye prohrammy pryrobotky trybosystem. *Materialy VI-oyi mizhnarodnoyi konferentsiyi «Problemy dovhovichnosti materialiv, pokryttiv ta konstruktsiy»*, 13 - 15 veresnya 2018 roku: zbirnyk naukovykh prats. Chastyna 1. Vinnytskyy natsionalnyy tekhnichnyy universytet [ta insh.]. – Vinnytsya: VNTU, 2018. S.57.

3. Voitov A. V., Biekirov A. Sh. Vybir informatyvnykh parametriv akustychnoyi emisiyi dlya vyznachennya shvydkosti znoshuvannya trybosystemy na perekhidnykh rezhymakh. *Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Derevoobroblyvalni tekhnolohiyi ta systematekhnika lisovoho kompleksu»* -Kharkiv: KHNTUSH, 2019. S. 36.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ	22
1.1 Релаксаційні явища, сумісність матеріалів при терті та їх застосування в моделях тертя та зношування	22
1.2 Аналіз факторів, що впливають на процеси припрацювання трибосистем, моделювання процесів припрацювання	29
1.3 Аналіз застосування акустичної емісії при дослідженні процесів тертя і зношування	37
1.4 Висновки до першого розділу, мета та завдання досліджень.....	49
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
2.1 Структура методики досліджень.....	51
2.2 Об'єкти досліджень, експериментальна установка і схеми випробувань.....	54
2.3 Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для визначення швидкості зношування в трибосистемі в процесі припрацювання.....	57
2.4 Планування експерименту та обробка результатів	68
2.5 Висновки до другого розділу.....	70
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРИБОСИСТЕМАХ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО МАЩЕННЯ.....	72
3.1 Структурна ідентифікація динамічної моделі перехідних процесів в трибосистемах	72
3.2 Параметрична ідентифікація динамічної моделі перехідних процесів в трибосистемах	83
3.3 Результати моделювання процесу припрацювання трибосистем в умовах граничного мащення, оцінка похибки моделювання	92

3.4	Висновки по третьому розділу	111
РОЗДІЛ 4 КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ПРОЦЕСУ ПРИПРАЦЮВАННЯ		
Трибосистем в умовах граничного мащення.....		
		113
4.1	Критерій оцінки добротності трибосистем	113
4.2	Критерії оцінки чутливості і припрацювання трибосистем	120
4.3	Критерії оцінки інерційності трибосистем при зміні зовнішніх впливів	125
4.4	Критерії оцінки стаціонарності процесу припрацювання трибосистем	131
4.5	Висновки по четвертому розділу.....	136
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ПРИПРАЦЮВАННЯ		
Трибосистем. Експериментальна перевірка		
програми припрацювання.....		
		139
5.1	Обґрунтування структури програми припрацювання трибосистем	139
5.2	Моделювання процесу припрацювання трибосистеми за різними програмами	142
5.3	Експериментальна перевірка програми припрацювання трибосистем	150
5.4	Розробка програми обкатки шестеренних насосів НШ-10.....	156
5.5	Оцінка економічного ефекту від впровадження програми обкатки насосів.....	161
5.6	Висновки до п'ятого розділу.....	163
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....		
		165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		
		169
ДОДАТОК А Порівняння результатів моделювання і експерименту для різних конструкцій трибосистем.....		
		189
ДОДАТОК Б Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....		
		202
ДОДАТОК В Акти впровадження.....		
		204

ВСТУП

Актуальність теми. Під час проектування нової техніки вирішують багатометричне 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.

Згідно з опублікованими роботами знос за період припрацювання становить $1/3 - 1/2$ величини зносу за період експлуатації. Тому врахування величини зносу за час припрацювання є необхідною ланкою в методиках і методах розрахунку на зносостійкість на етапі проектування нових машин.

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. Отримання таких рівнянь і їх рішень носить назву структурної і параметричної ідентифікації. 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 у 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.

Мета дослідження: Виходячи з вищесказаного, 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 поставленої мети в роботі вирішувалися такі **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.

Особистий внесок здобувача.

Отримано диференційні рівняння перехідного процесу для моделювання швидкості зношування і коефіцієнта тертя в трибосистемах. Показано, що характер протікання перехідного процесу залежить від коефіцієнтів підсилення і постійних часу, які входять в диференційні рівняння, а відсутність або наявність коливальних – від величини декременту загасання.

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.

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. Теоретично обґрунтовані й експериментально підтверджені 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_s , 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.

Розроблено і обґрунтовано структуру програми припрацювання трибосистем. Експериментальна перевірка розробленої програми на різних конструкціях трибосистем дозволила встановити ефективність режимів припрацювання і розрахувати похибку моделювання процесу припрацювання.

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 р.); *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.).

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.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Релаксаційні явища, сумісність матеріалів при терті та їх застосування в моделях тертя та зношування

Вивченню певних аспектів сумісності матеріалів пар тертя присвячені роботи Б.І. Костецького, Д.М. Гаркунова, Р.М. Матвієвського, М.М. Хрущова, Ф.П. Боудена і Д. Тейбора.

Перша узагальнююча робота в цьому напрямку представлена М.О. Буше [1]. У ній поставлено ряд завдань, які на думку автора роботи потрібно було вирішувати, щоб обґрунтувати проблеми сумісності. Після перших публікацій, присвячених сумісності матеріалів, в останні роки вийшов ряд робіт з даної проблеми [2-5]. В першу чергу, визначено поняття сумісності матеріалів. Найбільш ємне поняття на основі перерахованих вище робіт дано М.О. Буше в роботі [1]. Воно полягає в здатності контактуючих матеріалів пристосовуватися один до одного і до постійно змінюваних умов тертя з урахуванням взаємодії матеріалів зі змащувальним матеріалом і навколишнім газовим середовищем, забезпечуючи задану довговічність вузла тертя і стійку його роботу без змащувального матеріалу або в режимі порушення цілісності змащувальної плівки.

У більш пізній роботі [5] було уточнено поняття сумісності як здатності трибосистеми забезпечувати оптимальний стан в заданому діапазоні умов роботи за обраними критеріями. По суті, при розгляді сумісності вирішуються завдання оптимізації структури трибосистеми.

Вибір раціональної структури трибосистеми повинен здійснюватися з урахуванням даних експлуатації, так само як і вибір критеріїв сумісності, кількість яких за останні роки невпинно зростає. При цьому, частина критеріїв оцінює властивості елементів трибосистем, а частина –

трибосистему в цілому. До числа перших відносяться критерії, що оцінюють здатність елементів трибосистеми пристосовуватися один до одного, особливо в режимі змішаного мащення або без мащення, а також критерії зносостійкості, задиростійкості та припрацювання [6, 7].

Вибору критеріїв сумісності матеріалів трибосистем присвячені роботи Б.І. Костецького [8] і Л.І. Берщадського [9], які залучили до вивчення процесів тертя і зношування закони термодинаміки незворотних процесів. Запропонована в роботі [8] структурно-енергетична пристосованість визначається процесами структурної самоорганізації, пов'язаної з утворенням вторинних структур при терті. Критеріями оптимізації в цьому випадку є умови роботи трибосистеми (тиск, швидкість ковзання, температура тощо), при яких починається дисипативна самоорганізація, яка визначається ентропійним накачуванням при квазірівноважному стані системи [9].

З огляду на те, що тертя є динамічним і дисипативним процесом, кількісною характеристикою релаксаційних властивостей поверхневих шарів може служити внутрішнє тертя матеріалів трибоелементів. Не маючи функціонального зв'язку з традиційними механічними характеристиками, внутрішнє тертя є самостійною фізико-механічною характеристикою матеріалу [10,11].

За допомогою внутрішнього тертя можна визначати структурно-чутливу характеристику матеріалу, тобто характеристику, яка залежить не лише від складу і типу кристалічної структури, а й від структурних особливостей, що виникають протягом експлуатації (роботи) зразка. Внутрішнє тертя, що характеризує здатність матеріалу до розсіювання енергії коливань з малою і великою амплітудою, пов'язане зі щільністю, концентрацією і рухливістю дислокацій і точкових дефектів кристалічної структури.

Час, необхідний для встановлення рівноважного значення деформації, визначається процесами перебудови, що відбуваються всередині твердого

тіла під дією зовнішніх напружень. Природа цих процесів може бути найрізноманітнішою: атомною, магнітною або тепловою.

Аналіз робіт [10, 11] свідчить про те, що в процесі роботи вузла тертя відбувається формування поверхневих шарів. Залежно від міцності матеріалів і прикладених навантажень дані шари можуть мати структуру, яка монотонно змінюється по глибині від поверхні, або структуру, яка різко змінюється. Дані структури дуже сильно впливають на процес тертя і зношування за рахунок різних механізмів релаксації енергії, що підводиться до вузла тертя.

В роботі [12] розглянуті деякі показники (критерії) сумісності та методи їх визначення. Одним з перших був запропонований температурний критерій сумісності [13]. Показником сумісності є перехідна температура, при якій відбувається підвищення коефіцієнта тертя при використанні того чи іншого антифрикційного матеріалу. Автором робиться висновок, що оцінку сумісності треба проводити з урахуванням використаних в трибосистемі матеріалів пар тертя і мастильного матеріалу.

Розглянемо дослідження реакції трибосистеми на зміну режиму тертя. Як було встановлено в роботах І.І. Карасика [6, 7], в процесі припрацювання, яке відбувається при змішаному режиму мащення, досягається розширення діапазону роботи трибосполучення в режимі гідродинамічного мащення під час експлуатації. Таке можливо за рахунок зниження шорсткості поверхонь тертя і вузол тертя при цьому отримує додаткову здатність навантаження.

Розглянемо дослідження сумісності матеріалів пар тертя при втомному зношуванні. Як було показано в роботах І.І. Гарбара [14], фрагментація структур в поверхневих шарах є причиною зносу внаслідок відшарування. Ступінь фрагментації структури залежить від величини енергії дефектів упаковки. При її зменшенні фрагментація утруднена, що повинно призводити до підвищення зносостійкості при втомному зношуванні.

Показники сумісності, які засновані на ентропійно-енергетичному підході [9], отримані зі сформульованого Л.І. Бершадським як принцип

дисипативної (вторинної) гетерогенності, який впливає на структурну пристосованість трибосистем. У подальших роботах авторами було показано [15], що найбільш ефективним способом припрацювання є створення зон нестійкості пластичної течії і наклепу черв'ячного колеса шляхом вібраційного впливу і використання пластичного мастила з добавкою поверхнево-активних речовин.

Енергетичні показники сумісності обґрунтовано в роботі [16], в якій міститься структурно-енергетична інтерпретація процесу тертя і розроблені стадійні схеми адаптації трибосистеми і метод дослідження сумісності трибосистем, названий трибоергодинамікою. Автором запропоновано обґрунтування задиростійкості як одного з критеріїв сумісності.

Критерії сумісності, пов'язані з вичавлюванням м'якої структурної складової, обґрунтовано в роботах [17-21]. Автори стверджують, що в режимах змішаного мащення підвищена антифрикційність досягається завдяки м'якій структурній складовій антифрикційних сплавів, таких як олово, свинець, кадмій і ін., яка при посиленні режиму тертя вичавлюється в область контактної взаємодії і переноситься на сполучену поверхню. Формування м'якої структурної складової в значній мірі визначається пластичною деформацією поверхневих шарів. Аналіз умов утворення м'якої структурної складової, виконаний в [17], показав, що товщина вичавленого шару на поверхні зростає зі збільшенням навантаження, температури і зменшенням шорсткості поверхні тертя. Суттєве значення має відмінність у властивостях матриці і м'якої структурної складової.

За останній час з'явилася велика кількість статей, присвячених нерівноважній термодинаміці стосовно до тертя [22-28]. 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 [9,29, 30] і Б. Кламецькі [31-34]. Б. Кламецькі запропонував вважати формування змінених поверхневих структур при терті і зношуванні

фундаментальним явищем при терті. Згідно Л.І. Бершадському таке формування поверхневих шарів відповідає саме організації з утворенням дисипативних структур. Автори робіт вважали, що це призводить до зниження інтенсивності зношування.

Подальший розвиток принципів нерівноважної термодинаміки і теорії самоорганізації в трибології з отриманням конкретних результатів наведено в роботах [35-40], особливо при розробці нових зносостійких матеріалів. У зазначених роботах показано, що інтенсивність зношування знижується зі зменшенням виробництва ентропії. На думку авторів для зниження інтенсивності зношування потрібно ініціювати і інтенсифікувати процеси з негативним виробництвом ентропії. Такі процеси мають місце після самоорганізації і формування дисипативних структур. Розглянуто можливості зсуву самоорганізації в більш м'які умови тертя. В роботі [40] наведені приклади практичного застосування цих положень для зниження інтенсивності зношування. До таких заходів відноситься відповідний підбір матеріалів трибоелементів, який дозволяє підвищити ймовірність процесу самоорганізації.

Останнім часом для вивчення і моделювання процесів самоорганізації та адаптації матеріалів в трибосистемах активно використовується метод рухливих клітинних автоматів (МКА), сутність якого викладена в роботі [41]. На основі дискретно-континуального опису проведено чисельне моделювання поведінки пар тертя, що складаються як з однакових, так і з істотно різнорідних матеріалів. Відзначено утворення «квазіридинного» шару в парах з різнорідних матеріалів в дві стадії, перша з яких характеризується утворенням «згустків», що перемежуються розрідженими областями. Періодично мінливий тиск змінює ефективний коефіцієнт тертя, але амплітуда коливань слабо позначається на його значенні.

Порівняння результатів моделювання, отриманих дискретно-континуальним і дискретним методами, показує, що комбінований метод дає

зможу об'єднати переваги континуального і дискретного описів і уникнути їх основних недоліків.

МКА використовувався в роботах [42-45] для розв'язання окремих завдань розрахунку зносу, де для опису шорсткості поверхні використовували пакет програм ANSYS. Аналіз наведених робіт показує, що такий підхід стикається з проблемами використання як обчислювальних програм, так і технічної реалізації їх на комп'ютері.

Для прогнозування ресурсу, крім методу МКА, використовують і інші методи, такі як метод граничних елементів [46-51], а також метод трибоелементів [52].

Автором роботи [52] запропоновано описувати знос масивом векторів ймовірностей величин зносу дискретних точок поверхні, названих «трибоелементами». Трибоелемент моделюється нестационарними випадковими функціями марковського типу. Знос оцінюється математичним визначенням ймовірності знаходження трибоелементів в деякому стані. Форма зношеної поверхні визначається за допомогою кубічної сплайн-апроксимації математичних очікувань зносу в точках розташування трибоелементів. Для визначення контактних тисків використовуються відомі закономірності теорії пружності для тонких покриттів.

Новий підхід в дослідженнях і моделюванні процесів самоорганізації та адаптації матеріалів в трибосистемах представлений в роботах [53-59]. Підсумком ідеальної еволюції елементарної трибосистеми є утворення унікальної наноструктури – механічного (нано) кванта. На думку автора роботи [60], механічний квант являє собою мінімальне число атомів, здатних забезпечити таке їх конфігураційне розподілення (структуру), яке має властивість зупиняти, сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху (впливу). Він також є найменшим структурним утворенням в умовах пластичної деформації і утворюється при переході трибосистеми через гранично активований (критичний) стан внаслідок розвитку самоорганізаційних процесів адаптації. Власне

механічний квант слід розглядати як елементарну наноструктуру металевого твердого тіла. Автором [60] представлена сконструйована модель цього атомарно-шорсткого теоретичного кристала, що складається з 8103 кубічних атомних осередків. Взаємний ротаційно-коливальний рух цих механічних квантів, відносно один одного всередині елементарної трибосистеми, визначає стан найбільш досконалої дисипативної структури тертя. Власне, такий стан описується рівнянням квазіідеального твердого тіла, коли взаємодію між елементами структури (механічними квантами) мінімізовано (ідеальна пружність квазів'язкої течії).

Таким чином, огляд існуючих сучасних уявлень сумісності та адаптації матеріалів в трибосистемі, а також методів розрахунку і моделювання тертя і зношування, що враховують структуру, склад і властивості матеріалу, показує перспективність чисельних методів в розробці моделей тертя і зношування в умовах граничного навантаження. Створення динамічної моделі перехідних процесів в трибосистемах повинно будуватися на основі структурно-енергетичного підходу і враховувати процеси утворення і руйнування поверхневих шарів (вторинних структур) і їх вплив на перехідні процеси, наприклад, припрацювання. Для адекватного моделювання перехідних процесів в структуру моделей необхідно вводити величини, що характеризують структуру сполучених матеріалів і їх здатність адаптуватися до зовнішніх збурень або впливів. Такою характеристикою може служити внутрішнє тертя структури матеріалів.

У зв'язку з цим одним із завдань дослідження даної дисертаційної роботи є розробка математичної моделі перехідних процесів в трибосистемах з урахуванням фактора структури сполучених матеріалів, геометричних розмірів трибоелементів, навантаження, швидкості ковзання та мастильного середовища.

1.2 Аналіз факторів, що впливають на процеси припрацювання трибосистем, моделювання процесів припрацювання

Припрацювання трибосистем є завершальним технологічним етапом в процесі виготовлення або ремонту машин і, одночасно, початковим етапом експлуатації. В процесі припрацювання формуються робочі поверхневі шари трибосистем, забезпечуючи надалі максимальний ресурс і мінімальні втрати на тертя. В процесі припрацювання формується оптимальна шорсткість сполучених поверхонь в трибосистемі, а також активно відбуваються фізико-хімічні явища, такі як теплові, дифузійні, деформаційні, які мають місце в зоні тертя в присутності мастильних середовищ і навколишнього середовища. Існує велика кількість параметрів і критеріїв оцінки ефективності припрацювання, основними з яких є час перехідного процесу; знос за припрацювання; швидкість зношування і коефіцієнт тертя на сталому режимі; максимальне експлуатаційне навантаження і температура. Однак, на думку автора роботи [61], критерії оцінки ефективності і якості процесу припрацювання потребують наукового обґрунтування.

Фундаментальною роботою, яка присвячена процесам припрацювання, можна вважати роботу [61]. У даній роботі проведено системний аналіз і комплексні дослідження процесів припрацювання, на підставі яких сформульовано висновок про виконання процесу припрацювання на межі заїдання.

Авторами робіт [61-63] проведено системний аналіз і комплексне експериментальне дослідження трибологічних процесів при недосконалому мащенні поверхонь тертя в умовах, що поступово змінюються (в результаті припрацювання і зношування), спадковими і неспадковими характеристиками сполучення. Зокрема: перехідних і сталих процесів при постійному та лінійно зростаючому навантаженні; саморегульованого перехідного процесу припрацювання в режимі на межі заїдання як найбільш, на думку авторів [61-63], ефективного. У даних роботах вперше досліджено

процес припрацювання як фундаментальну трибологічну властивість матеріалів і трибосистем, виявлені закономірності впливу припрацювання на зносостійкість, гранично допустимий знос, стійкість до заїдання і фрикційну теплостійкість. З урахуванням вимог системності та стандартизації, розроблені методологія та інженерні методи експериментальної оцінки комплексу критеріїв припрацювання. Ці методи дозволяють управляти триботехнічними показниками матеріалів і конструкцій на етапах проектування і експериментального відпрацювання, атестації та контролю якості виробів. У розроблених критеріях диференційовано враховуються такі чинники і їх взаємовплив: екстенсивні та інтенсивні складові припрацювання; спадкові і неспадкові чинники; ефекти початкового і повторного припрацювання; характеристики структурної трансформації (перерозподіл мікроструктурних складових, механічні та теплофізичні властивості, мастильна дія).

В роботі [64] авторами виконано аналіз різних видів припрацювання, де зазначається, що найбільш поширеними є припрацювання з навантаженням, що ступінчасто збільшується. На підставі проведених досліджень автори роблять висновок, що найбільш ефективною є припрацювання на межі заїдання.

Авторами робіт [65-68] розроблено математичну модель для оцінки впливу технології припрацювання по температурі спалаху на фрикційному контакті, виходячи з теплофізичних характеристик і режимів роботи. На основі проведених експериментальних досліджень [68] робиться висновок, що для ефективності проведення припрацювання необхідно застосовувати три режими. Перший, що проходить на мікрогеометричному рівні, для згладжування і зрізання мікронерівностей поверхонь тертя. Протягом другого режиму інтенсивність зношування знижується, поверхні тертя зміцнюються, зменшуються втрати на тертя. Третій, завершальний режим, характеризується стабілізацією інтенсивності зношування, втрат на тертя і

температури. Перехід від режиму до режиму здійснюється зміною навантаження і швидкості ковзання.

Аналіз результатів досліджень, виконаних автором роботи [69], показує, що найкращий результат припрацювання контактуючих поверхонь тертя досягається через 20 хвилин після початку етапу. Нормальне навантаження на етапі припрацювання слід задавати з урахуванням максимального навантаження основного етапу випробувань. Зменшення навантаження призводить до недостатнього зношування мікроступів шорсткостей поверхонь тертя, а підвищення навантаження спричиняє інтенсивну адсорбцію поверхнево-активних речовин фрикційної присадки, що входить до складу змащувального матеріалу, на поверхнях, що контактують та сприяє збільшенню значень коефіцієнту тертя на початку основного етапу випробувань.

Однак, як показали дослідження автора [70-72], також як і багато інших досліджень, процесу припрацювання при зростаючому навантаженні властива різко виражена змінність взаємодії поверхонь тертя за рівнем інтенсивності. Автором роботи [72] встановлено, що на кожному ступені навантаження в початковий період інтенсивність взаємодії поверхонь найбільш висока і домінуючим видом взаємодії при цьому є пластична деформація. У міру реалізації ефектів припрацювання різної природи і енергонасиченості, напружено-деформований стан поверхні перетворюється в пружно-пластичний, а потім – в пружну деформацію, як найменш енерговитратну.

Таким чином, для опису і достовірної оцінки режиму припрацювання, по ходу його проходження, з представленого спектру видів взаємодії поверхонь, слід визнати домінуючою пластичну деформацію поверхонь на початку кожного ступеня навантаження. Цей часовий відрізок припрацювання характеризується найбільшою інтенсивністю пластичної деформації і, отже, інтенсивністю теплогенерації.

Поглиблене дослідження механічних процесів, які супроводжують припрацювання [72], показало, що вихідні мікронерівності неприпрацьованих поверхонь мають достатню протяжність в напрямку ковзання і тому пластичне деформування поверхонь тертя можливо в межах висоти мікронерівностей. Це підтвердилося при визначенні меж пластично деформованого шару на графічних моделях мікрорельєфу припрацьованої поверхні методом побудови ліній ковзання. Пластичне деформування може виникнути і при наявності мастила. Для цього необхідно, щоб дотичне напруження в контакті досягло максимального значення, достатнього для пластичної течії.

В роботі [73-75] досліджувалися особливості впливу антифрикційних матеріалів вузлів тертя машин на припрацювання в залежності від характеру зміни зовнішнього навантаження. Автором встановлено, що зовнішні впливи при обкатці механізму забезпечують умови ефективного припрацювання в тому випадку, якщо робота вузла тертя проходить в режимі сталого змішаного мащення. Область ефективного припрацювання знаходиться в зоні критичних значень параметра Зоммерфельда. Ця зона обмежена, з одного боку, досягненням на початку кожного ступеня навантаження режиму змішаного мащення без переходу до тертя в умовах граничного мащення, з іншого – областю рідинного мащення з повним поділом поверхонь гідродинамічним тиском. Тобто, реалізується така зміна зовнішніх параметрів, при якому в вузлі тертя забезпечуються ефективні умови контактування поверхонь – при постійній відносній частці руйнування мастильного шару, що розділяє поверхні.

Зміна параметрів зовнішнього впливу викликає динамічні зміни властивостей поверхневих плівок і відповідний механізм адаптації. В умовах випробувань, які проведені в роботі [75], визначальним параметром зовнішнього впливу було нормальне навантаження і, в меншій мірі, швидкість ковзання і температура. Характер зміни навантаження дає змогу виявити суттєві відмінності в поведінці однойменних матеріалів, які

припрацьовані по різних режимах. Важливим фактором в таких умовах, на думку автора роботи, є швидкість навантаження.

На думку авторів роботи [76], до основних факторів, що визначають фізико-хімічні явища припрацювання, можна віднести питоме навантаження – P (МПа) та швидкість ковзання – v (м/с). Навантаження має суттєвий вплив на якість і тривалість припрацювання. Зі збільшенням навантаження в початковий момент зростає частка пластичної деформації тонкого поверхневого шару, що призводить до збільшення кількості тепла, що виділяється, і поглиненої енергії. Високі механічні напруги, зумовлені збільшенням тиску на площадках контакту, зумовлюють дефектність структури поверхонь тертя, що збільшує активність металу. Дослідження, проведені в роботі [76], показують, що зі збільшенням навантаження до величини, що не перевищує деякого критичного значення, якість припрацювання поверхні поліпшується. Вплив швидкості ковзання виражається через співрозмірність часу існування плями фактичного контакту з часом релаксації напружень, які виникають на плямі контакту. На думку авторів роботи, на сьогодні процес припрацювання поверхонь в присутності мастильного матеріалу за режимами, які б зменшували як час, так і знос від даного етапу, є одним з найменш вивчених питань. Актуальність дослідження процесу припрацювання та впливу на нього режимів тертя обумовлена тим, що оптимізація цього процесу сприяє підвищенню довговічності вузлів тертя.

На основі проведеного аналізу автори роботи [76] роблять висновок, що ефективність процесу припрацювання в значній мірі визначається режимом навантаження. Припрацювання протікає більш ефективно за постійної швидкості ковзання і ступінчастого збільшення навантаження. Ступінчасте навантаження і одночасне регулювання фрикційного тепловиділення пари тертя призводить до розширення області гранично-допустимих навантажень, зменшення часу та зносу від припрацювання.

В роботі [77] запропоновано механізм припрацювання, в якому основну роль відіграє синтез, в процесі якого формуються молекули, кластери, нанорозмірні частинки. В нерівноважних умовах трибологічного контакту, в процесі обміну з навколишнім середовищем речовиною та енергією, частинки формуються в структури дисипативного типу, які визначають рівень трибологічних процесів. Автори роботи, застосувавши рівняння переносу Больцмана, отримали аналітичний вираз для еволюційного процесу припрацювання експоненціального типу. На думку авторів, основними характеристиками припрацювання є час припрацювання та зношування від початкового етапу. Управління рівнем характеристик можливе за допомогою зовнішніх факторів (збільшення навантаження в процесі) та внутрішніх (структурою твердих тіл і мастила).

На думку авторів робіт [78, 79], найбільш прогресивними є методи, в яких поєднані кілька способів припрацювання, що дають змогу підвищити ефективність процесу механічної взаємодії поверхонь, що труться за рахунок впливу електричної, хімічної і інших енергій. Одним з таких є метод припрацювання з накладенням змінного електричного струму на сполучення деталей [80]. Переваги електрохіміко-механічного впливу для вирівнювання поверхонь сполучених деталей широко використовується західними вченими [81-85]. Застосування суміщених процесів дозволяє отримувати високоточні профілі поверхонь на твердосплавних деталях або там, де потрібна висока точність геометричної форми. Автор роботи [86] виділив вісім різновидів залежностей моменту тертя на початку припрацювання трибоспряжень. У його роботах закладені фундаментальні основи вивчення процесів припрацювання. Найбільш перспективним при виготовленні робочих поверхонь є застосування суміщених процесів і різних технологій. Наприклад, електрохіміко-механічне полірування, яке широко застосовується для формування поверхонь із заданими властивостями на деталях з карбиду кремнію [87], титану [88], на мідних поверхнях [89, 90], в електронній промисловості [91]. Основи технології цих процесів описані в роботах

західних вчених [92-95]. При цьому основи полірування міді та срібла ще раз доводять ефективність даного виду припрацювання за рахунок того, що формоутворення поверхні проходить при гідродинамічному режимі тертя за рахунок електрохімічного фактора [96, 97]. Застосування органічних кислот значно посилює позитивний ефект при хіміко-механічному поліруванні поверхонь при виготовленні сучасних деталей мікроелектронної промисловості [98, 99]. Зарубіжними вченими розроблялися математичні моделі процесів полірування з урахуванням занурення абразивних частинок в оброблювану поверхню. Крім цього, були розроблені моделі хіміко-механічного полірування міді за допомогою плоского притирання [100]. Особливе місце в дослідженнях приділяється формуванню різних шарів мастила між поверхнями, що труться [99].

Дослідження контактної взаємодії змащених поверхонь проведені А.Г. Кузьменком і О.В. Дихою, дозволяють розглянути питання припрацювання тертьових поверхонь з урахуванням механічного фактора зношування для сполучень, які не мають макрогеометричних відхилень [101]. Метод оцінки триботехнічних властивостей для умов режиму роботи, представлений в монографії Дмитриченка М.Ф. і Мнацаканова Р.Г. [102], дав можливість побудувати математичну модель залежності інтенсивності зношування від сукупності вихідних параметрів: товщини змащувального шару, роботи тертя, динамічної в'язкості змащувального матеріалу, мікротвердості, режиму роботи.

В роботі, виконаній під керівництвом В.В. Ауліна [79], робиться висновок, що на зміну моменту тертя, що характеризує різні процеси припрацювання, впливає цілий ряд факторів. До основних з них можна віднести наступні: 1 – зміна шорсткості, яка була сформована при фінішній обробці поверхні; 2 – зміна тиску на поверхнях під час припрацювання; 3 – зміна режимів тертя внаслідок збільшення площі плями контакту; 4 – зміна товщини шару змащувального матеріалу або робочого середовища, що розділяє поверхні тертя; 5 – зміна інтенсивності впливу електрохімічних

чинників процесу при використанні суміщених методів припрацювання; 6 – зміна впливу присадок на припрацювання поверхонь; 7 – зміна характеру зношування поверхонь і видалення продуктів зносу із зони тертя; 8 – властивості матеріалів деталей; 9 – температура в зоні тертя.

Роботи вітчизняних вчених [103-108] спрямовані на розробку методів моделювання перехідних процесів в трибосистемах на етапі проектування нових машин. Визначено і фізично обґрунтовано критерії оцінки перехідних процесів в трибосистемах, в якості яких виступають коефіцієнти підсилення і постійні часу диференційних рівнянь [106, 107]. Встановлено, що коефіцієнти підсилення K_1 визначають реакцію трибосистеми на збурення. Коефіцієнти підсилення K_2 , а також постійні часу T_1 визначають режими раціонального припрацювання трибосистем.

Коефіцієнти підсилення K_3 і постійна часу T_2 доповнюють характер поведінки трибосистеми. Доповнення полягає у визначенні величини максимального збільшення сили тертя в процесі припрацювання.

Авторами робіт розроблено методику математичного моделювання перехідних процесів в трибосистемах [108], яка дозволяє визначати ресурс і механічні втрати на тертя трибосистем, що проектуються.

У роботах зарубіжних вчених, присвячених моделюванню процесів припрацювання [109, 110], перехідні процеси розглядаються як міждисциплінарне питання. Враховуються параметри шорсткості поверхонь тертя, характеристики матеріалів і хімічні процеси на поверхнях тертя під час припрацювання. Особлива увага приділяється моделюванню процесів в нанодоменах поверхні тертя. Для цього використовуються специфічні інструменти моделювання, такі як молекулярна динаміка, яка дозволяє моделювати складні трибологічні процеси.

Підводячи підсумок аналізу робіт, присвячених режимам припрацювання і моделювання процесів припрацювання, можна зробити висновок, що одним із завдань даного дисертаційного дослідження є

розробка критеріїв оцінки перехідних процесів в трибосистемі, отримання теоретичних залежностей зміни значень критеріїв, швидкості зношування, коефіцієнта тертя і часу припрацювання, які дозволять обґрунтувати і розробити програму ефективного припрацювання різних конструкцій трибосистем.

1.3 Аналіз застосування акустичної емісії при дослідженні процесів тертя і зношування

Акустична емісія (АЕ), як спосіб діагностування при механічних випробуваннях, широко використовується з початку 1980-х років в якості ефективного методу отримання інформації про зміну стану матеріалу в процесі навантаження. Перші роботи по застосуванню АЕ були присвячені випробуванням статично навантажених конструкцій і їх діагностуванню в процесі експлуатації [111, 112]. Одночасно розвивалися способи діагностування вузлів тертя як динамічних систем. Такі процеси, як деформація і руйнування поверхневих шарів при терті, завжди супроводжуються появою сигналів акустичної емісії [113, 114]. Узагальнюючою роботою за можливостями АЕ при діагностуванні вузлів тертя можна назвати монографії [114, 115], які дали потужний імпульс у розвитку методу АЕ для діагностування трибосистем.

З математичної точки зору, акустичний сигнал із зони тертя являє собою функцію, яка містить інформацію про фізичні властивості досліджуваного об'єкта (трибосистеми). Більшість сигналів представлені в часовій області функціями часу. При відображенні таких сигналів на графіку незалежною координатою є вісь часу, а залежною – вісь амплітуд (амплітудно-часове представлення сигналу). У процесі реєстрації аналоговий сигнал АЕ, який генерується в зоні тертя і сприймається чутливим елементом – п'єзодатчиком, перетворюється в цифровий сигнал. Очевидно, що при

великому інтервалі дискретизації вибірки і грубому квантуванні існує загроза втрати інформації, яку містить сигнал [116].

Сучасні уявлення про природу тертя і зношування свідчать про те, що цей процес не є стаціонарним. Акустичні коливання при терті ініціюються ударною взаємодією мікровиступів і пружньопластичною деформацією поверхонь, що труться, процесами руйнування фрикційних зв'язків і структурно-фазовою перебудовою матеріалів, утворенням і розвитком мікротріщин в поверхневих шарах взаємодіючих тіл, відділенням частинок зносу [113-115]. Фрикційна взаємодія двох тіл відбувається не по всій площі контактуючих поверхонь, а в межах «плям контакту». Через дискретність фрикційного контакту, а також випадковий характер розподілів температурних і деформаційних полів, тертя і зношування мають статистичну природу. Реєстрація акустичних сигналів дозволяє з високою точністю визначити час подій, що відбуваються, які включають в себе пружню взаємодію мікровиступів сполучених поверхонь, утворення і руйнування адгезійних зв'язків, появу мікротріщин і відділення частинок зносу.

Існують різні підходи до побудови моделі АЕ при терті [113-116]. Це дозволяє розробити модель, засновану на застосуванні кінетичної концепції міцності твердих тіл [117], згідно з якою руйнування являє собою термоактивоване зародження ансамблю мікротріщин, їх злиття і зростання результуючої макротріщини. Ця модель передбачає, що інтенсивність АЕ (число імпульсів за одиницю часу), визначається кінетикою руйнування [118], що дозволяє виконати розрахунок часової залежності інтенсивності АЕ при відповідному термоактивованому зародженні ансамблю мікротріщин в динамічно навантаженому об'єкті контролю. У даній моделі за основу береться фрагментована структура, що утворюється при терті твердих тіл в зоні контакту та визначається фізико-механічними і геометричними властивостями взаємодіючих поверхонь [119, 120]. Характерний розмір осередку визначається відповідно до масштабу фрикційного зв'язку. При

фрикційній взаємодії всі осередки, в яких реалізуються дотичні напруження, які перевищують критичне напруження розриву, руйнуються механічно з відділенням частки зносу. Крім того, можливе руйнування осередків в результаті термоактивованого зародження, зростання і розвитку ансамблю мікротріщин. В діапазоні реальних контактних навантажень складова АЕ, що визначається термоактивованим механізмом, вносить певний внесок.

Подальший розвиток такий підхід отримав в роботі [121], де на підставі аналізу наведених вище робіт запропонована модель виникнення акустичної емісії при терті твердих тіл, яка ґрунтується на уявленні зони контакту, як фрагментної структури, що випромінює АЕ. З використанням уявлень кінетичної теорії міцності отримані вирази, що дозволяють оцінити активність і амплітуду сигналу акустичної емісії при терті.

На думку автора статті [122], робота сил тертя йде на деформування поверхневих шарів матеріалу і збільшення їх внутрішньої енергії, а також на прямий нагрів матеріалу. Теоретичні оцінки і прямі вимірювання, які виконані автором, показують, що температура на плямах фактичного контакту досягає 700 – 800 °С, тоді як температура решти матеріалу залишається близькою до температури навколишнього середовища і не перевищує 30 – 60 °С. Час існування температурних піків становить величину порядку 10^{-3} с, а тривалість перехідних режимів, пов'язаних з нагріванням і охолодженням матеріалу при виникненні і зникненні мікроконтакта, оцінюється в 0,1 – 1,0 мс. Наявність в процесі тертя термічних піків, великих контактних динамічних навантажень, пружного і пластичного деформування, дифузійного перерозподілу, руйнування поверхневих шарів і утворення мікротріщин, є причиною ряду фізичних процесів супутніх тертю, що спричиняють помітну зміну енергетичного стану матеріалу або вузла. При вивільненні енергії частина її звільняється у вигляді пружних хвиль. Поява таких хвиль і визначає явища акустичних коливань у фрикційному контакті.

На підставі виконаних досліджень автор виділяє такі основні джерела акустичних коливань, що діють на різних структурних рівнях:

1) механізми, відповідальні за пластичне деформування (процеси, пов'язані з явищами адгезії і рухом дислокацій): зернограничне ковзання; пластичне відтиснення, відшаровування і масоперенос; перехід дислокацій через межі; зміна модулів пружності; відрив дислокаційних петель від точок закріплення; текстуровання шарів;

2) механізми, пов'язані з руйнуванням: мікрорізання і абразивне зношування; накопичення мікропошкодження і розвиток тріщин; процеси глибинного виривання і схоплювання металів, які призводять до заїдання.

Основним висновком роботи [122] є запропонований механізм виникнення акустичних коливань. Якщо число елементарних подій, що призводять до виникнення пружних хвиль, велике, а енергія мала, то акустичні сигнали сприймаються як слабкий безперервний сигнал (безперервні коливання). Через незначну кількість енергії, що вивільняється при одиничному акті, енергетичний стан тіла змінюється незначно. Імовірність здійснення наступного такого акта практично не залежить від попереднього. Як наслідок, характеристики акустичних коливань змінюються в часі порівняно повільно, що дозволяє розглядати цей етап як квазістаціонарний процес.

Якщо стан досліджуваного матеріалу або вузла є нерівноважним (зародження дефектів, порушення режимів мащення), можливі процеси бурхливого характеру, під час яких за малий проміжок часу в процес втягується велике число елементарних подій. У цьому випадку коливання характеризуються великою амплітудою реєстрованих акустичних імпульсів (дискретні коливання).

Для прогнозування руйнувань, утворення і розвитку тріщин зазвичай використовують дискретні коливання, зважаючи на простоту реєстрації сигналу великої амплітуди. Дискретний сигнал використовують також для дослідження і контролю зносу і порушень режимів мащення. З цього

впливає, що процеси утворення і руйнування адгезійних зв'язків, властиві процесу припрацювання, супроводжуються явищами як безперервних, так і дискретних коливань.

Якщо розглядається тільки дискретна акустична емісія, то в цьому випадку сигнали АЕ не накладаються один на одного, і кожен сигнал АЕ може бути зареєстрований і оброблений. Такий підхід дозволив авторам роботи [123] встановити, що тріщини розриву (вертикальні тріщини) супроводжуються відносно короткими сигналами АЕ з великою амплітудою, а тріщини зсуву (горизонтальні тріщини) - довгими сигналами з невеликою амплітудою. Передбачається, що вертикальні тріщини розриву відповідальні за розміри і форму майбутніх частинок зносу, а горизонтальні тріщини - за реальний процес зсуву і відділення частинок. Автори роботи роблять висновок, що енергія сигналів АЕ, що виникають при утворенні тріщин, пропорційна площі тріщин або, в разі тертя, розміру частки зносу. Звідси випливає, що знос, який є пропорційний кількості частинок і їх розмірам, відповідає енергії АЕ, яка виділяється в процесі утворення тріщин. Крім того, акустичний сигнал може бути обумовлений не лише процесом руйнування, а й іншими причинами (пластична деформація поверхневих шарів матеріалу, утворення вторинних структур, фазові перетворення і т. п.).

Якщо швидкість ковзання в парі тертя велика і сигнали АЕ перекриваються, то обробка інформації значно ускладнюється. Щоб вийти з цього становища авторами роботи [123] пропонується використовувати спектральний аналіз сигналів АЕ [124]. Спектральний аналіз, згідно з [125], є найбільш інформативним способом коректної оцінки енергії сигналу АЕ. Передбачається, що сигналам від вертикальних і горизонтальних тріщин властиві різні частотні спектри. В результаті в роботі [123] розроблено підхід, заснований на аналізі спектральних характеристик сигналів АЕ, який дозволяє визначати знос матеріалів вузлів тертя без зупинки самого процесу тертя. Авторами робиться висновок, що при високих швидкостях ковзання,

при квазінеперервних АЕ розроблений метод виявляється єдино можливим методом оцінки зносу матеріалів в процесі тертя.

Феноменологічна модель одиничного джерела акустичної емісії представлена в роботі [126]. Вихідним параметром моделі є акустичний амплітудно-частотний спектр. Розрахунки, виконані автором, показують, що швидкості деформації на плямах фактичного контакту досить великі і знаходяться в межах $10^2 \dots 10^4$ 1/с, що відповідає удару. На підставі проведених досліджень автором робляться висновки, що порівняння спектрів сигналів АЕ дозволяє визначити критичні, з точки зору схоплювання, області режимів експлуатації по навантаженню і швидкості ковзання.

У роботах [127, 128] за допомогою методу акустичної емісії було показано, що зношування являє собою періодичний процес, який характеризується послідовністю подій накопичення дефектів, утворення деформованого поверхневого шару і його руйнування. Реєстрація акустичних сигналів дозволяє з високою точністю визначити час подій, що відбуваються, які включають в себе пружну взаємодію мікроступів сполучених поверхонь, утворення і руйнування адгезійних зв'язків, появу мікротріщин і відділення частинок зносу. Однак авторами робиться висновок, що ідентифікувати тип акустичного сигналу з тією або іншою подією надзвичайно важко.

В роботі [129] зростання сили тертя і швидкості рахунку АЕ пов'язують з руйнуванням і видаленням поверхневого шару. Максимум інтенсивності рахунку АЕ досягається при катастрофічному руйнуванні поверхні, після чого інтенсивність рахунку АЕ різко зменшується. Дослідження, виконані авторами роботи [130], показали, що інтенсивність рахунку акустичних сигналів корелює зі змінами медіанної частоти, максимумами якої відображають моменти руйнування поверхневого шару в трибоконтаті. Виявлено, що зростання медіанної частоти акустичних сигналів обумовлено появою високочастотних складових в спектрі сигналу, які властиві етапу

формування поверхневого шару, що також супроводжується зростанням коефіцієнта тертя. При бурхливому руйнуванні поверхневого шару з відділенням частинок зносу відбувається різке падіння коефіцієнта тертя, медіанної частоти і енергії акустичних сигналів. Проведені авторами [130] дослідження показали, що для застосування методу акустичної емісії для діагностики і контролю процесів тертя і зношування в трибоспряженнях необхідно виконати аналіз різних параметрів АЕ, які попередньо повинні бути співставлені з етапами еволюції структури поверхневого шару.

На думку авторів робіт [131-134], застосування методу АЕ в трибології продовжує залишатися перспективним напрямком, оскільки дозволяє отримувати інформацію про поведінку матеріалів в процесі тертя і стабільність зношування в реальному часі.

Зазвичай при дослідженні акустичної емісії сигнал записується у вигляді фреймів – послідовності коротких відрізків однакової тривалості, оцифрованих із заданою частотою дискретизації. Потім записаний сигнал піддається обробці, в результаті якої отримують усереднені за фреймами параметри АЕ, такі як інтенсивність випромінювання і медіанна частота, яка ділить площу під кривою спектральної щільності енергії на дві рівні частини [135-137]. Аналіз акустичного випромінювання трибосистеми [135] показав, що є два характерних типи фреймів з істотно різною формою сигналу. Фрейми першого типу (тип I) характеризуються стрибкоподібним зростанням сигналу від деякого постійного до максимального рівня, з подальшим більш плавним падінням до початкової величини. Підвищення амплітуди сигналу супроводжується також різким підвищенням медіанної частоти від 80 до 240 кГц і подальшим зниженням до початкового значення. Реєстрований сигнал за формою є аналогічним сигналу, який отримано при крихкому руйнуванні графіту в процесі тертя в парі з твердосплавним індентором [138].

Другий характерний тип фреймів (тип II) за формою сигналу відрізняється від описаного вище більш високою середньою інтенсивністю

сигналу і відсутністю яскраво виражених піків. Головна відмінність між двома типами фреймів полягає в поведінці медіанної частоти. Тип II характеризується значно нижчою медіанною частотою. На більшій частині фрейма вона становить приблизно 40 кГц. Крім того, спостерігаються квазіперіодичні зміни медіанної частоти, коли її значення зменшується нижче 30 кГц. Моделювання, проведене в роботі [139], показало, що зменшення частоти генерованих трибосистемою коливань відбувається внаслідок інтенсивного пластичного деформування поверхневого шару матеріалу. Розрахунки також показали, що в умовах адгезійного тертя пластична деформація поверхневого шару носить не безперервний, а квазіперіодичний характер [140]. На підставі цих двох чинників авторами роботи [135] робиться висновок, що фрейми типу II випромінюються трибосистемою при інтенсивному пластичному деформуванні. При цьому процес деформування не є стаціонарним і протікає за схемою, аналогічною «stick-sleep». Швидкість пластичної деформації змінюється циклічно від мінімального до максимального значення, що призводить до формування деформованого рельєфу доріжки тертя.

Подальший розвиток методики аналізу сигналу АЕ з метою встановлення взаємозв'язку між зміною його параметрів всередині фрейму і процесами на поверхні тертя, такими як пружне і пластичне деформування, зародження і поширення тріщин, фазові перетворення, відділення частинок зносу тощо, проведено в роботі [141]. Авторами встановлено відповідність між подіями на поверхні тертя і їх "акустичними портретами", які дозволяють в подальшому ідентифікувати конкретні події під час випробування за змінами медіанної частоти всередині фрейму. Ґрунтуючись на цьому, в даній роботі застосована методика розрахунку медіанної частоти з використанням віконного перетворення Фур'є і розглянутий акустичний відгук двох різних пар тертя, в яких при фрикційному контакті реалізується крихке руйнування і інтенсивна пластична деформація.

Таким чином, проведені дослідження показали, що застосована в роботі [141] методика дозволяє ідентифікувати поширення тріщин і пластичну деформацію на поверхні тертя. Виявлено, що характерною ознакою сигналу, що генерується мікротріщинами, є одночасне різке підвищення амплітуди і медіанної частоти всередині фрейму АЕ. При пластичній деформації матеріалу зростання амплітуди навпаки супроводжується зниженням медіанної частоти сигналу.

Огляд літературних джерел, який виконано в роботі [142], дозволяє зробити висновок, що дослідження з акустико-емісійного діагностування механізмів здебільшого ґрунтуються на використанні ознак, які походять зі споріднених галузей техніки. Перед усім це ознаки дискретної емісії: рахунок (кількість імпульсів, зареєстрованих за весь час випробувань); активність (кількість імпульсів за одиницю часу) [143]. Що стосується неперервної емісії (коли окремі імпульси розрізнити неможливо), то її характеризують параметрами, що широко використовуються у вібраційній діагностиці – середньоквадратичним значенням, пік-фактором (відношенням пікового значення до середньоквадратичного), спектром коливань [144]. Крім того, використовують часові параметри (тривалість фронту та спаду імпульсів) [144], параметри розподілу імпульсів за амплітудою та застосовують вейвлет-перетворення [145]. На думку автора роботи [142], указані параметри не враховують повною мірою особливості акустичної емісії пар тертя механізмів.

В роботі [142] розроблено класифікацію акустико-емісійних ознак за критеріями їх відповідності задачі діагностування пар тертя та обґрунтовано вимоги до перспективних ознак. Автором обґрунтовано показники, за якими здійснюватиметься класифікація. По-перше, це вплив різноманітних чинників на амплітуду вихідного сигналу датчика акустичної емісії – загасання пружних хвиль у матеріалі деталі та при переході між деталями, розкид чутливості датчиків, значна нерівномірність їх амплітудно-частотних

характеристик, залежність чутливості датчика від устанавлення на об'єкті (площинності та шорсткості поверхні).

По-друге, це зростання потужності неперервного сигналу емісії чи активності дискретної емісії через певні проміжки часу, обумовлені контактуванням деталей на ділянках втомного руйнування чи короткочасним граничним тертям.

Виходячи із цих особливостей, показниками для класифікації акустико-емісійних ознак обрано:

- інваріантність до масштабування сигналу по амплітуді;
- інваріантність до зміни порядку слідування відліків сигналу в часі, табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація акустико-емісійних ознак дефектів пар тертя [142]

Акустико-емісійні ознаки	Інваріантність до масштабування сигналу по амплітуді	Інваріантність до зміни порядку слідування відліків сигналу в часі
Спектр, вейвлет-коефіцієнти	Ні	Ні
Амплітуда, потужність, рахунок, активність	Ні	Так
Тривалість імпульсів, тривалість фронту та спаду імпульсів	Так	Ні
Пік-фактор, гістограма амплітуд, інформаційна ентропія	Так	Так

Найбільш сприятливим сполученням властивостей ознак є інваріантність до масштабування по амплітуді та неінваріантність до зміни порядку слідування відліків сигналу в часі (табл. 1.1). Проте слід зауважити, що вимірювання тривалості імпульсів утруднене через багаторазове відбиття імпульсів від поверхонь деталей.

Що стосується спектрального аналізу та вейвлет-перетворення, то їм властиві порівняно великі обсяги обчислень та об'єми вихідної інформації, яка потребує подальшої обробки.

На думку автора роботи [142], перспективні діагностичні ознаки повинні бути інваріантними до масштабування сигналу акустичної емісії по амплітуді, оскільки це суттєво послабить вплив варіацій чутливості датчиків та затухання сигналу в елементах конструкції на результат діагностування. Що стосується зміни порядку слідування відліків сигналу в часі, то перспективні діагностичні ознаки повинні бути неінваріантними до нього, щоб бути придатними для виявлення сплесків емісії при контактуванні дефектних ділянок поверхні деталей. У даній роботі пропонується використовувати нерівномірність розподілу імпульсів акустичної емісії в часі як ознаку для діагностування підшипників кочення.

Узагальнення досліджень [146- 151] призводить до висновку про те, що при діагностиці переважно використовуються такі стандартизовані параметри акустичної емісії, як рахунок і швидкість рахунку (з використанням декількох порогових рівнів), спектральний аналіз, тривалість сигналів, гістограма амплітуд, потужність сигналу. Аналізуючи викладене вище, автор роботи [152] робить висновок, що перераховані діагностичні параметри ефективно використовуються при дослідженні процесів тертя на спеціальних стендах, коли протягом випробування використовується один і той же датчик, постійно встановлений на об'єкті контролю. Якщо ж необхідно тривало здійснювати періодичне діагностування з використанням різних датчиків, які періодично закріплюються на об'єкті, то слід звернути увагу на чутливість параметрів до масштабування сигналу АЕ по амплітуді і зміни амплітудно-частотної характеристики датчика. Обумовлено це конструктивним розкидом параметрів датчиків і впливом властивостей технологічної поверхні (неплощинність, шорсткість) і контактного матеріалу, що заповнює зазор між датчиком і цією поверхнею, на його амплітудно-частотну характеристику.

На підставі виконаних досліджень автор [152] робить висновок, що при діагностуванні трибосистеми ковзання в якості діагностичного параметра необхідно використовувати інтервал кореляції обвідної вузькосмугового сигналу АЕ. Цей діагностичний параметр інваріантний до масштабування сигналів АЕ по амплітуді, що спрощує діагностування агрегатів в експлуатації.

На підставі аналізу робіт західних вчених [153-161], автором роботи [162] робиться висновок, що перспективним напрямком досліджень є обґрунтування акустико-емісійних ознак дефектів підшипників кочення, інваріантних до масштабування сигналу по амплітуді. Обумовлено це тим, що флуктуації загасання емісії, відмінності амплітудно-частотних характеристик датчиків емісії та інші фактори впливають на результат вимірювання енергетичних параметрів емісії, таких як енергія, середньоквадратичне значення, спектр і результат вейвлет-перетворення. Перераховані фактори впливають на параметри акустичної емісії, при обчисленні яких здійснюється порівняння сигналу з деяким пороговим рівнем. На думку автора роботи [162], процедура вибору такого рівня часто недостатньо формалізована або ґрунтується на факторах, які самі є мінливими (наприклад, власний шум підсилювача або фоновий рівень емісії). Тому при вимірюванні часових параметрів акустичної емісії доцільно пороговий рівень вибирати відповідно до порядку квантиля розподілу амплітуд, що визначається з умови мінімуму ймовірності похибки діагностування.

Підводячи підсумок аналізу виконаних досліджень з вибору інформативних параметрів АЕ для діагностування трибосистем, можна зробити висновок, що для реєстрації швидкості зношування на перехідних режимах (під час припрацювання), найбільш інформативним і інваріантним параметром може виступати потужність сигналу АЕ, яка генерується поверхнями тертя, які знаходяться в контакті і взаємному переміщенні.

Потужність сигналів АЕ корелює з величиною реєстрованих амплітуд за певний проміжок часу (рівень квантування).

Застосування частотних характеристик проблематично, оскільки пов'язано зі зміною частоти початкового сигналу АЕ при проходженні по конструкційних матеріалах з різним модулем пружності, що спотворює сигнал.

Тому одним із завдань цього дослідження є розробка способу і методики визначення швидкості зношування трибосистем при нестационарних режимах під час припрацювання в онлайн-режимі, що дасть можливість вивчати перехідні процеси в різних конструкціях трибосистем та розробити ефективну програму припрацювання.

1.4 Висновки до першого розділу, мета та завдання дослідження

Огляд існуючих теорій тертя і зношування, методів і моделей, побудованих на базі цих теорій, показує перспективність структурно-енергетичного підходу до розробки моделей для вивчення перехідних процесів в трибосистемах. 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.

З наведеного аналізу моделей перехідних процесів слідує, що такі моделі повинні розроблятися у вигляді диференціальних рівнянь, які найкращим чином будуть відображати динамічний процес у часі. 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 і зношування в трибосистемі, які можна визначити тільки використовуючи динамічні методи

аналізу, такі як акустична емісія, з обґрунтуванням реєстрованих параметрів і методики реєстрації та обробки сигналів.

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.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

У відповідності до поставлених завдань дослідження в цьому розділі розглядається методичний підхід, який застосовується при дослідженні характеру поведінки параметрів перехідного процесу в трибосистемі в залежності від конструкції трибосистем і величини вхідного впливу.

Підхід включає в себе комплексні дослідження в лабораторних умовах різних конструкцій трибосистем в різних мастильних середовищах і при різному поєднанні матеріалів. В процесі таких досліджень реєструвалися параметри перехідних процесів в часі – швидкість зношування і коефіцієнт тертя, можливість реєстрації яких забезпечувалася спеціально розробленою методикою на основі методу акустичної емісії.

2.1 Структура методики досліджень

Згідно Міждержавного стандарту ГОСТ 30480-97 "Забезпечення зносостійкості виробів. Методи випробування на зносостійкість. Загальні вимоги" використовувався системний підхід до вирішення поставлених завдань.

Методично дослідження складаються з трьох частин. Перша частина – теоретичні дослідження, основу яких складає розробка математичної моделі перехідних процесів в трибосистемах, аналіз моделі і результатів моделювання, обґрунтування критеріїв оцінки чутливості, інерційності та припрацювання трибосистем.

Друга частина – експериментальні дослідження, які мають на меті підтвердити адекватність математичної моделі і оцінити похибку моделювання.

Третя частина – розробка практичних рекомендацій і програми припрацювання трибосистем, експериментальна перевірка ефективності розробленої програми припрацювання і її порівняння з іншими програмами.

Вхідними параметрами в даній роботі є навантаження і швидкість ковзання; робочі площі тертя рухомого і нерухомого елементів трибосистеми і обсяги матеріалу під робочими площами тертя, які враховуються коефіцієнтом форми трибосистеми [163]; матеріали рухомого і нерухомого трибоелементів, які оцінюються величиною внутрішнього тертя структури матеріалу [164, 165], а також коефіцієнтом температуропровідності; мастильне середовище, яке враховується показником трибологічних властивостей [166]. Перераховані параметри можуть змінюватися (регулюватися) в процесі проведення досліджень.

У даних дослідженнях варіювалися різні поєднання матеріалів рухомих і нерухомих елементів, мастильне середовище, кінематична схема і геометричні розміри з'єднань, навантаження і швидкість ковзання.

В процесі експерименту реєстрували і визначали наступні робочі характеристики: швидкість зношування, яку розраховували на підставі вимірюного лінійного зносу; силу тертя, яку розраховували на підставі вимірюного моменту тертя, період припрацювання (перехідного процесу) в трибосистемах, а також параметри акустичної емісії, взаємозв'язок яких із швидкістю зношування буде показаний нижче.

Структура методики досліджень, що відображає завдання досліджень, представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1 – Структура методики досліджень

2.2 Об'єкти досліджень, експериментальна установка і схеми випробувань

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; $\delta= 3315$; $a = 1,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$);
40Х	(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 ESSO ULTRON SL/CF ($E_y= 7,2 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$).

При виборі експериментальної установки і засобів реєстрації параметрів тертя лабораторних трибосистем виходили з важливості використання при випробуваннях серійних машин тертя [167] і типових зразків, що дозволить в подальшому порівнювати без перерахунків результати, які отримані різними дослідниками. На думку авторів роботи [167] результати випробувань, отримані на різних випробувальних установках, значно різняться, що ускладнює їх аналіз і порівняння. Факторами, відповідальними за розкид результатів, є коефіцієнт форми

трибосистеми [163], рівень вібрацій самої випробувальної установки і ряд інших причин.

У процесі експериментальних досліджень використовувалася кінематична схема випробувань «кільце-кільце», що реалізується на машині тертя УМТ - 1. Дана схема випробувань моделює більшість опорних і упорних вузлів ковзання в конструкціях радіально-поршневих і аксіально-поршневих гідромашин. Однак для зниження розкиду результатів експерименту дана кінематична схема застосовувалася з використанням однієї випробувальної установки, універсальної машини тертя, конструкція якої описана в роботі [167] і наведена на рис. 2.2.

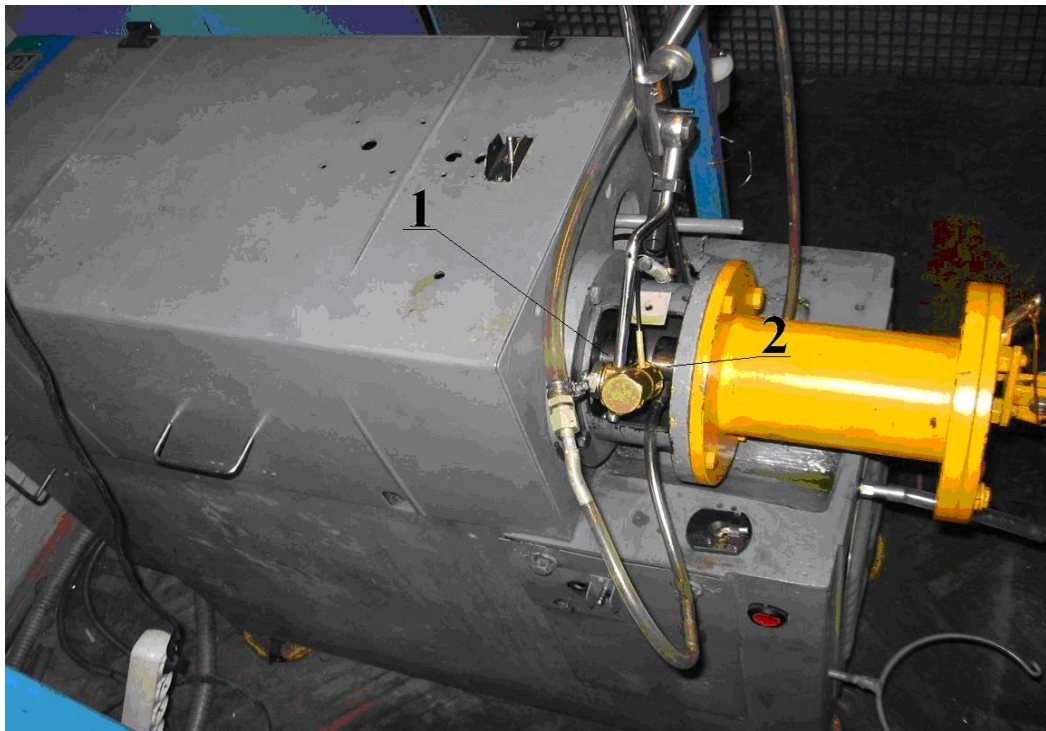


Рис. 2.2 – Кінематична схема контакту «кільце-кільце»:

1 - рухоме кільце; 2 - нерухоме кільце

Перед установкою на машину тертя зразки шліфувалися і притиралися за загальноприйнятою методикою ГОСТ 23.210-80. Шорсткість робочої поверхні, з огляду на випробування в парі з антифрикційними матеріалами,

доводилася до $Ra = 0,16$ мкм. З метою виключення мікрорізання гострі кромки притуплялися до $Ra = 0,5$ мм.

Для реалізації режимів граничного тертя на універсальній машині тертя була встановлена циркуляційна система мащення, рис. 2.3. Олива подавалася в зону тертя нерухомого 1 і рухомого 2 зразків через форсунку 3 за допомогою шестерінчастого насоса 4. Злив оливи в ємність 5, яка в одночасно виконує функцію бака, здійснюється самопливом. З метою виключення впливу продуктів зносу встановлено фільтр тонкого очищення 6. Привід шестерінчастого насоса здійснювався від електродвигуна через редуктор, причому редуктор дозволяв змінити передавальне число, що дозволяло змінювати витрати оливи через трибосистему.

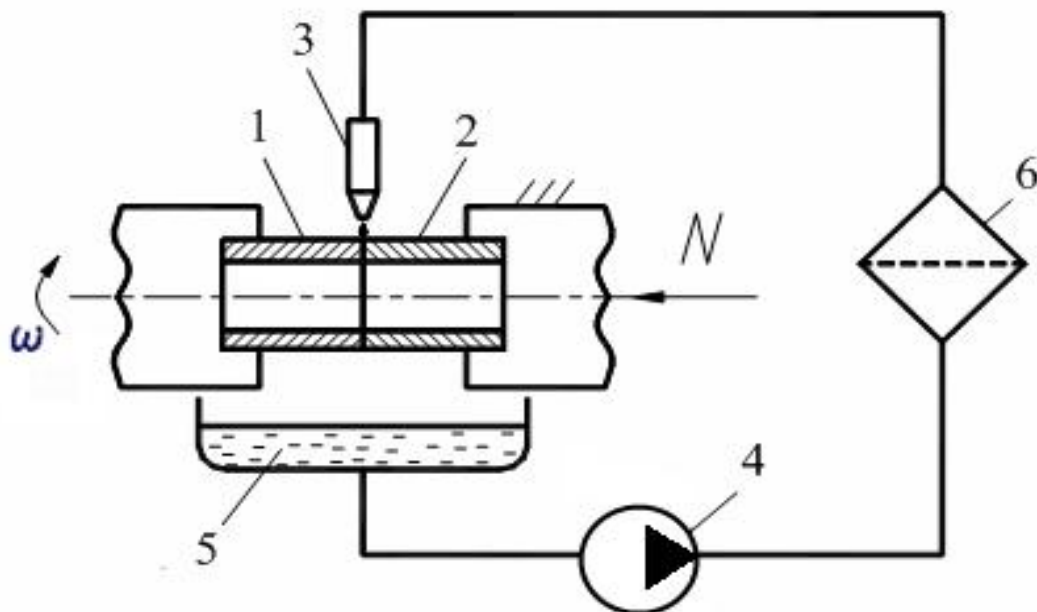


Рис. 2.3 – Схема системи мащення трибосистеми під час випробувань:
 1 – рухомий трибоелемент; 2 – нерухомий трибоелемент; 3 – форсунка;
 4 – шестерінчастий насос; 5 – ємність; 6 – фільтр тонкого очищення

В процесі експерименту реєстрували момент тертя, який перераховували в силу тертя за величиною якої визначали механічні втрати. Відтворюваність результатів визначалася згідно [168].

В роботі [169] наведено аналіз існуючих методів визначення зносу. Найбільш прийнятним для вирішення поставлених завдань є метод штучних баз, що дозволяє визначати лінійну швидкість зношування кожного із зразків трибосистеми. Використання даного методу визначено ГОСТ 23.301-78, а сутність методики виміру зносу викладена в [169]. Відмінністю від викладеної методики є застосування замість квадратної алмазної піраміди з кутом при вершині між протилежними гранями 136° алмазного конуса з кутом при вершині 120° .

Шорсткість поверхонь тертя після випробування визначалася згідно ГОСТ 2789-73 на профілографи-профілометри. Вимірювання температури в зоні тертя здійснювалося за допомогою хромель-капелевої термопари ХК-7. Час припрацювання трибосистеми визначався згідно з рекомендаціями [6].

2.3 Вибір інформативних параметрів акустичної емісії для визначення швидкості зношування в трибосистемі в процесі припрацювання

Аналізуючи інформаційний зміст параметрів АЕ, а також комплексні показники поверхневого руйнування, які представлені у вигляді аналізу в першому розділі даної роботи, можна зробити висновок, що для реєстрації швидкості зношування на перехідних режимах (під час припрацювання), найбільш інформативним і інваріантним параметром може виступати потужність сигналу АЕ, яка генерується поверхнями тертя, що знаходяться в контакті і взаємному переміщенні. Потужність сигналів АЕ корелює з величиною амплітуд за певний проміжок часу (рівень квантування).

Застосування частотних характеристик проблематично, так як пов'язано зі зміною частоти початкового сигналу АЕ при проходженні по конструкційних матеріалах з різним модулем пружності, що спотворює сигнал.

Тому одним із завдань цього дослідження є розробка способу і методики визначення швидкості зношування трибосистем на нестационарних режимах під час припрацювання в онлайн-режимі, що дасть можливість вивчати перехідні процеси в різних конструкціях трибосистем.

Для обґрунтування вибору інформативних параметрів АЕ при контролі процесів зношування в трибосистемі розглянемо зміну швидкості зношування трибосистеми в процесі припрацювання, рис. 2.4 і виду АЕ – фреймів сигналу, знятих під час перехідного процесу (припрацювання) трибосистеми в характерних точках, рис. 2.5. З представлених фреймів сигналу видно, що амплітуда АЕ, в подальшому $A(t)$, може бути задана як функція дійсної змінної t .

Після завершення перехідного процесу (сталий режим роботи), фрейм сигналів АЕ приймає вид, представлений на рис. 2.5, точка 3 і точка 4. Вивчення структури сигналів АЕ, представлених на рис. 2.5, дає підставу стверджувати, що на сталому режимі процес тертя і зношування має коливання.

Для виділення сигналів АЕ з шумів найбільш часто використовують частотну фільтрацію і амплітудну дискримінацію [115]. У даній роботі застосовувалася амплітудна дискримінація сигналів АЕ, яка здійснювалася шляхом введення в апаратуру порогового пристрою, що пропускає на вихід тільки ті сигнали, амплітуда яких перевищує деякий заданий рівень – рівень дискримінації. Обґрунтування рівня дискримінації здійснювалося експериментально і є важливою умовою отримання достовірних результатів.

Нестационарний процес характерний тим, що має певну тенденцію розвитку в часі і характеристики такого процесу залежать від початку відліку та від тривалості реєстрації. Однак для кожного нестационарного процесу існують відрізки часу, в межах яких, з відомим наближенням, цей процес може вважатися стаціонарним і ергодичним.

Таким чином, змінюючи інтервал інтегрування (задаючи досить малий інтервал) при зміні фреймів сигналів АЕ, можливо вивчення процесів

поверхневого руйнування (швидкості зношування і межі виходу на пошкоджуваність) на етапі припрацювання трибосистем.

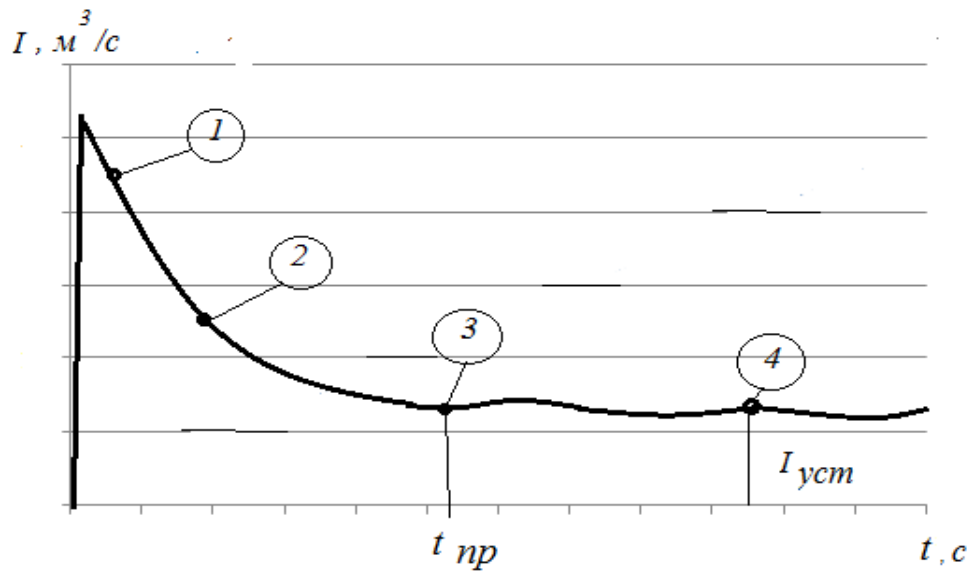


Рис. 2.4 – Характер зміни швидкості зношування трибосистеми в процесі припрацювання: t_{np} – час припрацювання; $I_{уст}$ – швидкість зношування після завершення припрацювання; 1 - 2 - 3 - 4 – характерні точки припрацювання.

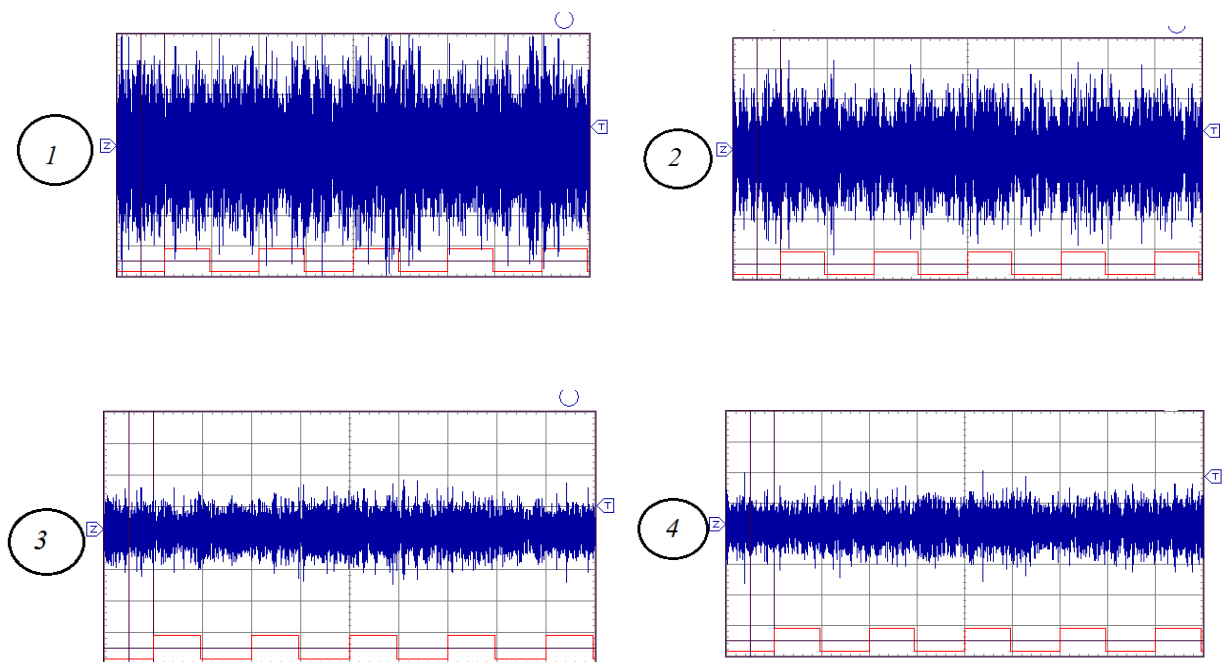


Рис. 2.5 – Фрейми сигналів АЕ в характерних точках на кривій припрацювання згідно рис. 2.4

Випадкова функція $A(t)$ може вважатися за визначенням стаціонарною, на певному інтервалі часу t , якщо всі її імовірнісні характеристики не змінюються при будь-якому зсуві аргументів, від яких вони залежать по осі t . Проте одна з основних умов, яким повинна задовольняти стаціонарна випадкова функція – це умова сталості дисперсії.

Тому при аналізі перехідних процесів інтервал часу реєстрації t амплітуд сигналів АЕ повинен вибиратися таким, щоб забезпечувалася умова сталості дисперсії. Даний інтервал в роботі визначається експериментально.

Велика кількість проведених експериментів з аналізу процесу припрацювання трибосистем показала, що при оцінці швидкості зношування на перехідних режимах найкраще використовувати потужність акустико-емісійного випромінювання, яка визначалася за виразом:

$$W_{AE} = \frac{A_{\Sigma}^2}{t_p}, \quad (2.1)$$

де A_{Σ}^2 – сумарне значення квадрата амплітуд всіх імпульсів АЕ, mB^2 за час реєстрації t_p ;

t_p – час реєстрації, с.

Експериментальні дослідження проводилися в два етапи і мали на меті визначити кореляційний зв'язок між швидкістю зношування – I_v , $m^3/год$ і потужністю сигналів АЕ – W_{AE} , $\frac{mB^2}{c}$.

Перший етап експериментальних досліджень мав на меті визначення функціонального зв'язку між перерахованими параметрами під час перехідного процесу.

Другий етап мав на меті визначення кореляційного зв'язку між перерахованими вище параметрами на сталому режимі роботи трибосистеми, тобто після завершення перехідного процесу (припрацювання).

Згідно роботи [6], завершення припрацювання можна визначати за стабілізацією наступних параметрів перехідного процесу: моменту тертя M_{mp} , Н•м; температури елементів трибосистеми T , °С; мінімальної дисперсії

АЕ випромінювання із зони тертя, в нашому випадку коливання величини дисперсії амплітуди АЕ – D, mB^2 . У даній роботі при проведенні експериментальних досліджень час завершення перехідного процесу визначався за всіма перерахованими вище параметрами.

Експериментальні дослідження проводилися на машині тертя, представлений вище, за кінематичною схемою «кільце-кільце» при таких поєднаннях матеріалів:

Перша трибосистема: рухомий трибоелемент сталь 40Х (45 ... 47 НRC), нерухомий трибоелемент Бр.АЖ 9-4 (90 ... 110 НВ).

Друга трибосистема: рухомий трибоелемент сталь 40Х (45 ... 47 НRC), нерухомий трибоелемент СЧМ (293 НВ).

Третя трибосистема: рухомий трибоелемент сталь 40Х (45 ... 47 НRC), нерухомий трибоелемент сталь 40Х (45 ... 47 НRC).

Для всіх трьох трибосистем мастильним середовищем була обрана моторна олива М-10Г_{2к} ($E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж / м}^3$).

Блок-схема експериментального устаткування для реєстрації та обробки сигналів АЕ представлена на рис. 2.6.

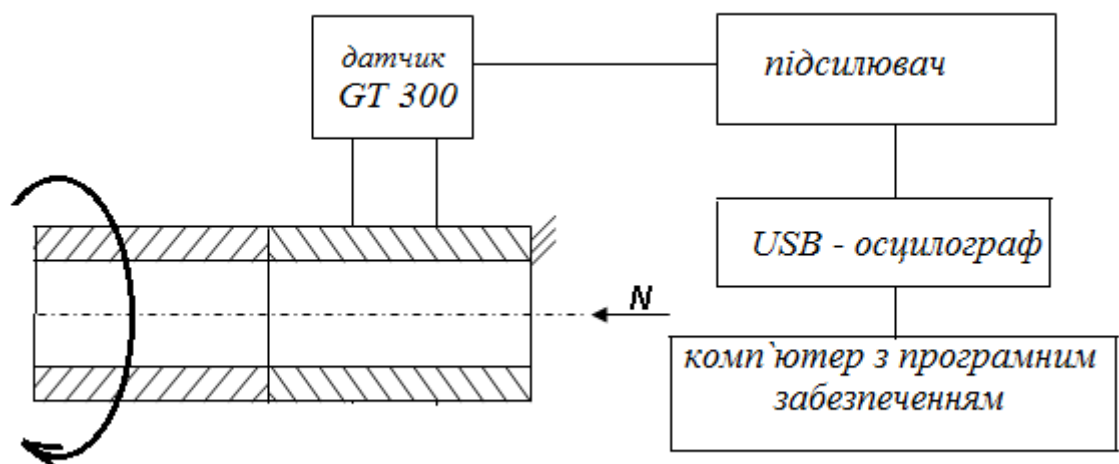


Рис. 2.6 – Блок-схема експериментального устаткування для реєстрації та обробки сигналів АЕ.

Сигнал акустичної емісії, що генерує трибосистема, сприймається з нерухомого трибоелемента широкосмуговим датчиком акустичної емісії GT300 (100 ... 800 кГц) і надходить в підсилювач, а з виходу підсилювача – в USB-осцилограф PV6501 і далі в комп'ютер.

Підсилювач складається з вхідного малопотужного каскаду, триполосного фільтра верхніх частот і підсилювача з регульованим коефіцієнтом передачі (1 - 100). Загальний коефіцієнт підсилення досягає 1000. Нижня межа смуги пропускання підсилювача обрано рівною 50 кГц, що відповідає низькочастотним датчикам акустичної емісії, що випускаються, наприклад, фірмою ГлобалТест (РФ). Верхня межа смуги пропускання обрано рівною 1,5 МГц, що перевершує відповідну межу серійних високочастотних датчиків акустичної емісії. Дане обмеження пов'язано також зі збільшенням загасання пружних хвиль у металі з ростом частоти.

Смуга пропускання застосованого USB-осцилографа становить 20 МГц, що багаторазово перевищує верхню межу смуг пропускання датчика і підсилювача акустичної емісії. Фільтр верхніх частот призначений для виділення сигналів акустичної емісії, що мають значно меншу інтенсивність, ніж сигнали АЕ. Послабивши проходження сигналів АЕ на вхід USB-осцилографа в 300 разів за допомогою фільтра верхніх частот і пропорційно збільшивши коефіцієнт підсилення, стало можливим виділити сигнал акустичної емісії з переважною частотою 70 - 600 кГц.

Осцилограф працював в режимі очікування, поріг запуску розгортки позначений символом «Т» на рис. 2.5. Тривалість попередньої вибірки була встановлена рівною 100 мкс, що дозволяє спостерігати значення сигналу, що передують перевищенню порогового рівня.

Результати вимірювань сигналу акустичної емісії USB-осцилографом зберігаються в комп'ютері, дані, що містяться в цих файлах, обробляються програмами статистичного аналізу з визначенням дисперсії квадрата амплітуд – D_A та сумарного значення квадрата амплітуд за час реєстрації –

A_{Σ}^2 . Маючи дані значення, за формулою (2.1) визначали W_{AE} . Час реєстрації t_p визначався експериментально за відтворенням результатів при рівнозначних повторях.

При перевірці однорідності дисперсій сукупності результатів сигналу АЕ на сталому режимі, що еквівалентно підтвердженню їх відтворюваності, в умовах вибірок малого обсягу, стандарт ISO 5725 рекомендує використання критерію Кохрена [168].

Критерій Кохрена дозволяє порівняти однорідність дисперсій результатів аналізу амплітуд сигналів АЕ в різних точках перехідного процесу.

Тестова статистика критерію Кохрена C_p визначається виразом:

$$C_p = \frac{D_{A_{\max}}}{\sum_{i=1}^n D_{Ai}}, \quad (2.2)$$

де $D_{A_{\max}}$ – найбільше значення дисперсії амплітуд під час перехідного процесу;

n – кількість вимірювань;

D_{Ai} – поточне значення дисперсії по i -му досліді.

Згідно стандарту ISO 5725 гіпотеза однорідності (відтворюваності) перевіряється за наступним виразом:

$$C_p < C_m, \quad (2.3)$$

де C_p – розрахункове значення критерію Кохрена, формула (2.2);

C_m – табличне значення критерію для заданого рівня значущості [168].

Якщо умова (2.3) виконується, то приймається гіпотеза про статистичні однорідності результатів вимірювань.

Експериментальні дослідження проводилися при наступних режимах тертя: навантаження $N = 800$ Н; швидкість ковзання 0,5 м/с.

В процесі експериментів за допомогою самописців машини тертя реєстрували в часі зміну моменту тертя, температури, та за допомогою комп'ютера розраховували дисперсію і потужність сигналів АЕ.

Результати експериментальних досліджень представлені у вигляді експериментальних залежностей на рис. 2.7, які відображають середнє значення потужності сигналів АЕ за трьома однотипними повторами і трьома трибосистемами з різним поєднанням матеріалів, де по осі X розміщені експериментальні значення потужності сигналів акустичної емісії з зони тертя, W_{AE} , формула (2.1), одиниця виміру – mB^2/c . Значення W_{AE} отримані для різних сполучень матеріалів в трибосистемі, різних навантажень і швидкостей ковзання. По осі Y відкладено відповідні розрахункові значення швидкості роботи дисипації в трибосистемах W_{mp} , які дорівнюють алгебраїчній сумі швидкостей роботи дисипації у рухомого і нерухомого трибоелементів, одиниця виміру – Дж/с. Формули для розрахунку W_{mp} представлені в роботі [170]:

швидкість роботи дисипації в рухомому трибоелементі;

$$W_p = \sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_p \cdot V_{dp}, \text{ Дж/с}, \quad (2.4)$$

швидкість роботи дисипації в нерухомому трибоелементі;

$$W_n = \sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_n \cdot V_{dn}, \text{ Дж/с}. \quad (2.5)$$

швидкість роботи дисипації в трибосистемі:

$$W_{mp} = W_p + W_n, \text{ Дж/с}. \quad (2.6)$$

У формулах (2.4) і (2.5) прийняті наступні позначення:

$\sigma_{фнк}$ – напруження на фактичних плямах контакту, Па;

$\dot{\epsilon}_p$, $\dot{\epsilon}_n$ – швидкість деформації в рухомому і нерухомому трибоелементах, 1/с;

V_{dp} , V_{dn} – об'єм матеріалу рухомого і нерухомого трибоелементів, який бере участь в деформації в процесі тертя, m^3 .

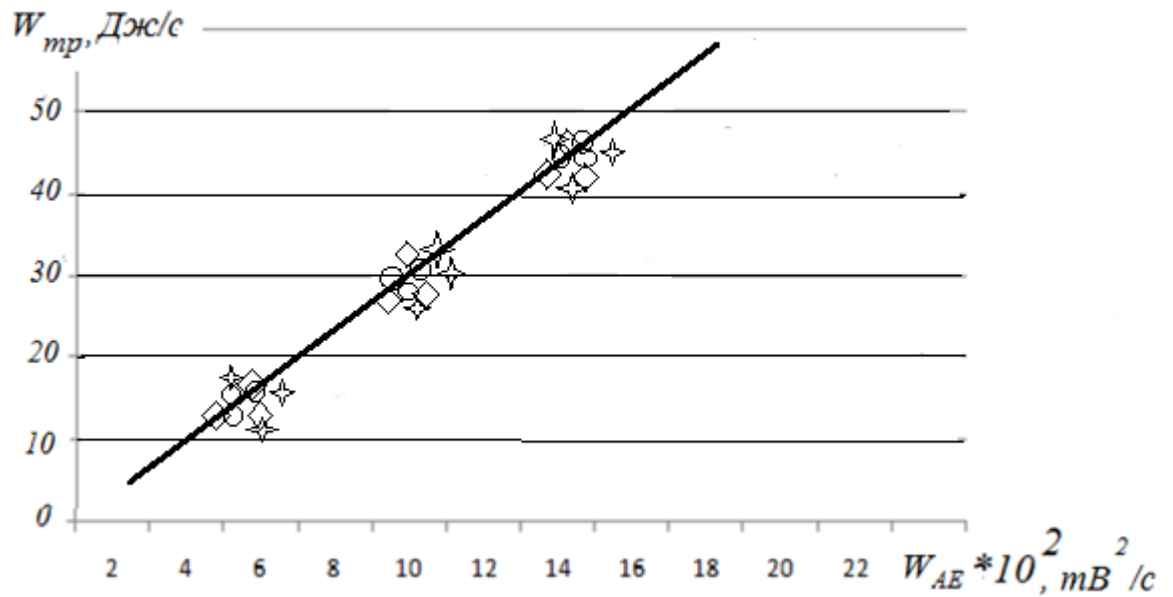


Рис. 2.7 – Залежність зміни швидкості роботи дисипації в різних трибосистемах W_{mp} від потужності сигналів акустичної емісії з зони тертя W_{AE} .

Отримана залежність, рис.2.7, встановлює лінійний взаємозв'язок між вимірною в процесі експерименту потужністю сигналів АЕ, формула (2.1) і швидкістю роботи дисипації в трибосистемі, формула (2.6). За допомогою методу найменших квадратів було отримано регресійне рівняння:

$$W_{mp} = 0,033 \cdot W_{AE} . \quad (2.7)$$

Залежність (2.7) дозволяє за вимірній в процесі експерименту потужності АЕ – W_{AE} , розрахувати значення швидкості роботи дисипації в трибосистемі W_{mp} . Використовуючи отримане значення W_{mp} і формулу, яка отримана в роботі [171], можна розрахувати швидкість зношування в трибосистемі в реальний момент часу:

$$I_V = 6 \cdot 10^{-10} \exp(0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{\delta_p \cdot \delta_H}} \cdot W_{mp}), \frac{\text{м}^3}{\text{год}}, \quad (2.8)$$

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

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

Другим етапом експериментальних досліджень стало визначення функціонального взаємозв'язку між швидкістю зношування I_V і параметрами АЕ – W_{AE} для зазначених вище трибосистем при зміні навантаження на вузлі тертя від 300 Н до 1200 Н на стаціонарному режимі роботи трибосистеми, тобто після завершення перехідного процесу (припрацювання). Зміна навантаження призводить до зміни швидкості роботи дисипації в трибосистемі – $W_{тр}$.

Мета досліджень – показати, що за величиною W_{AE} , mB^2/c , можна визначати величину швидкості зношування I_V , $m^3/год$.

Дослідження проводилися на стаціонарних режимах тертя, тобто знос за припрацювання не враховувався. Для цього після завершення припрацювання (після стабілізації параметрів) на поверхні тертя наносилися лунки для вимірювання зносу і після проведення випробувань протягом двох годин методом штучних баз визначався лінійний знос, який перераховували в об'ємний.

Швидкість зношування визначали за формулою:

$$I_V = \frac{\Delta b \cdot A_H}{t_e}, \quad m^3/год \quad (2.9)$$

де Δb – величина лінійного зносу, м;

A_H – площа тертя трибоелемента, m^2 ;

t_e – час проведення експерименту, год.

Результати експериментальних досліджень представлені на рис.2.8.

Виконаємо оцінку відтворюваності результатів вимірювань сигналів акустичної емісії за допомогою критерію Кохрена, формула (2.2). Параметри сигналів акустичної емісії при різних значеннях швидкості роботи дисипації для дисперсії амплітуд і дисперсії потужності АЕ зазначених вище трибосистем представлені в таблиці 2.1.

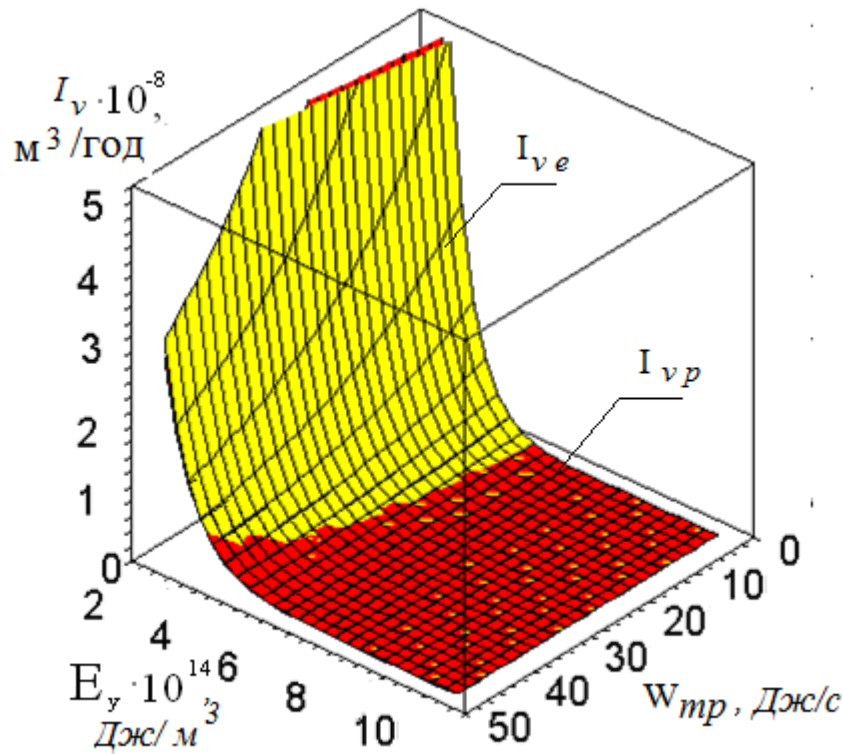


Рис. 2.8 – Розрахункові I_{vp} і експериментальні I_{ve} поверхні відгуку об'ємної швидкості зношування при зміні трибологічних властивостей мастильного середовища E_y і швидкості роботи дисипації W_{mp} в трибосистемі сталь 40X + Бр.АЖ 9-4

Таблиця 2.1 – Параметри сигналів акустичної емісії при різних значеннях швидкості роботи дисипації в трибосистемах

$W_{mp}, \text{Дж}/\text{с}$	D_{Amax}	ΣD_{Ai}	C_p	D_{wmax}	ΣD_{wi}	C_p	C_m
10	47,1	60,41	0,764	309,35	461,22	0,695	0,853
20	57,3	70,75	0,764	315,30	460,08	0,715	0,853
30	70,5	91,30	0,785	430,25	572,67	0,720	0,853
40	113,6	144,76	0,795	613,33	822,14	0,755	0,853

Аналіз розрахункових значень критерію Кохрена – C_p і табличних значень – C_m при заданому рівні значущості 0,95 (кількість оцінюваних параметрів – 2, кількість повторів – 10), дозволяє зробити висновок, що

умова (2.3) виконується, тобто результати вимірювань однорідні і відтворювані.

Для досліджуваних трибосистем коефіцієнт кореляції між залежностями I_V і D_A має значення $R = 0,96$, а для залежностей I_V і W_{AE} має значення $R = 0,98$.

З аналізу представлених значень в таблиці 2.1 слідує, що дисперсія амплітуд і потужність сигналів АЕ адекватно відображають процес зношування і знаходяться в функціональному взаємозв'язку зі швидкістю зношування. Це дозволяє висунути припущення, що за величиною потужності АЕ можна судити про величину швидкості зношування в будь-який момент роботи трибосистеми, тобто на перехідних режимах.

Методика визначення значень швидкості зношування під час перехідного процесу зводиться до наступних операцій:

1. Проводяться випробування конкретної трибосистеми і в процесі перехідного процесу реєструються параметри АЕ і згідно формули (2.1) розраховуються значення потужності акустичної емісії - W_{AE} .

2. За відомими значеннями W_{AE} , згідно виразу (2.7), розраховується значення швидкості роботи дисипації в трибосистемі в даний момент часу – $W_{тр}$.

3. Чисельне значення об'ємної швидкості зношування в даний момент часу - I_V визначають за формулою (2.8).

2.4 Планування експерименту та обробка результатів

При дослідженні перехідних процесів тертя та зношування в трибосистемах необхідною умовою експерименту є встановлення зв'язку між величиною швидкості зношування і потужністю сигналів АЕ, з одного боку, і вхідними параметрами – з іншого боку.

З метою зменшення трудомісткості дослідження при вивченні таких процесів застосовуються методи математичної статистики та планування

експерименту. За допомогою математичних методів оптимального планування експерименту можна отримати математичну модель процесу, що представляє собою систему рівнянь, що зв'язують функції відгуку з факторами, які впливають на процес [172].

Підставою для вибору плану багатofакторного експерименту послужив проведений в 1 розділі цієї роботи аналіз чинників, які впливають на швидкість зношування і силу тертя під час перехідного процесу і на стаціонарному режимі.

З огляду на велику кількість факторів в роботі був обраний трифакторний план Боксу-Бенкіна, таблиця 2.2.

Основою для вибору цього плану з'явилися його властивості, що дозволяють отримати однакову дисперсію значень функції відгуку в усіх рівновіддалених від центру плану експерименту точках [172].

Таблиця 2.2 – План експерименту Бокса-Бенкіна в кодових значеннях

№ експерименту	Фактори		
	X_1	X_2	X_3
1	0	0	0
2	1	0	1
3	2	0	2
4	3	0	3
5	4	0	4
6	0	1	1
7	1	1	2
8	2	1	3
9	3	1	4
10	4	1	0
11	0	2	2
12	1	2	3
13	2	2	4

Продовження таблиці 2.2

14	3	2	0
15	4	2	1
16	0	3	3
17	1	3	4
18	2	3	0
19	3	3	1
20	4	3	2
21	0	4	4
22	1	4	0
23	2	4	1
24	3	4	2
25	4	4	3

Статистична оцінка значимості коефіцієнтів регресії проводилася за допомогою критерію Стюдента, а перевірка на адекватність регресійного рівняння – за допомогою критерію Фішера [172].

Значення критерію Фішера є відношенням дисперсії адекватності до дисперсії відтворюваності дослідів. На підставі даних дисперсій розраховується критерій Фішера, який повинен бути менше табличного (при довірчій ймовірності 0,95).

Для виключення впливу на функцію відгуку систематичних похибок, викликаних зовнішніми умовами, досліди проводилися у випадковому порядку. Кількість повторних дослідів визначали на підставі критерію Кохрена [172].

2.5 Висновки до другого розділу

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

2. Зроблено вибір матеріалів, робочих середовищ і кінематичних схем контакту для проведення досліджень.

3. Для визначення максимальних значень швидкості зношування під час перехідного процесу обґрунтовано метод 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.

4. Отримано залежності, які дозволяють визначати швидкість роботи дисипації в трибосистемах під час перехідного процесу за значеннями потужності сигналів акустичної емісії, що дозволило розробити методику розрахунку величини швидкості зношування під час припрацювання в будь-якій точці перехідного процесу.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРИБОСИСТЕМАХ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО МАЩЕННЯ

3.1 Структурна ідентифікація динамічної моделі перехідних процесів в трибосистемах

Завдання ідентифікації математичної моделі перехідних процесів в трибосистемі, яка працює в умовах граничного навантаження, зводиться, в загальному випадку, до визначення оператора трибосистеми. Під оператором трибосистеми будемо розуміти математичну модель досліджуваного об'єкта. Огляд досліджень, який виконано в першому розділі даної роботи і присвячений аналізу математичних моделей перехідних процесів в трибосистемах під час припрацювання, дозволяє стверджувати, що структура моделі і тип рівнянь, якими передбачається описувати трибосистему – це лінійні диференційні рівняння другого порядку.

Отримання диференційних рівнянь перехідних процесів в теорії ідентифікації динамічних об'єктів носить назву ідентифікації.

Ідентифікація трибосистеми зводиться до задачі отримання математичної моделі, адекватної досліджуваного явища. Під структурою моделі будемо розуміти диференційне рівняння, що описує перехідний процес з точністю до коефіцієнтів.

У загальному вигляді математична модель перехідних процесів в трибосистемі буде складатися з двох блоків, рис. 3.1.

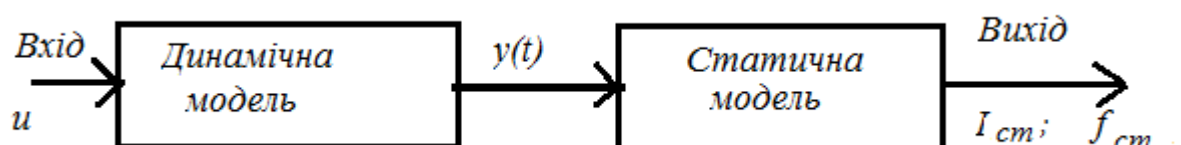


Рис. 3.1 – Структура математичної моделі трибосистеми

Перший блок – це модель, яка описує динаміку процесу.

Другий блок – це статична модель, яка описує роботу трибосистеми на стаціонарному режимі, тобто після завершення перехідного процесу (припрацювання).

Статична модель трибосистеми, яка характеризує роботу на стаціонарному режимі після завершення припрацювання, розроблена авторами робіт [170, 171] і має такий вигляд:

$$I_{cm} = 6 \cdot 10^{-10} \exp(0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{\delta_p \cdot \delta_H}} \cdot W_{mp}), \frac{m^3}{год} \quad (3.1)$$

$$f_{cm} = \frac{W_{mp}}{W}, \quad (3.2)$$

де I_{cm} и f_{cm} – об'ємна швидкість зношування, $m^3/год$ і коефіцієнт тертя трибосистеми після завершення припрацювання;

E_y – трибологічні властивості мастильного середовища, $Дж/м^3$;

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

W_{mp} – швидкість роботи дисипації в трибосистемі, яка дорівнює сумі швидкостей роботи дисипації у рухомого і нерухомого трибоелементів, $Дж/с$;

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

$$W = N \cdot v_{ков} = H \cdot \frac{M}{c} = Bm, \quad (3.3)$$

де N – навантаження на трибосистему, $Н$;

$v_{ков}$ – швидкість ковзання, $м/с$.

Згідно наведених вище виразів вхід u до трибосистеми на рис.3.1 визначає формула (3.3), а вихід з блоку динамічної моделі $y(t)$ - це $I(t)$ і $f(t)$.

Динамічна модель трибосистеми в теорії ідентифікації динамічних об'єктів може бути задана у вигляді звичайного диференційного рівняння n -го порядку в наступній формі [173-177]:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + Q_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + Q_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t), \quad (3.4)$$

де a_i , b_j , $i = 0; 1 \dots n$; $j = 0; 1 \dots m$ – параметри моделі, які необхідно ідентифікувати.

Для опису конкретного перехідного процесу в трибосистемі до диференційних рівнянь (3.4) необхідно додати початкові умови і застосовуючи перетворення Лапласа, отримати передавальну функцію в наступному вигляді:

$$G(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i p^i}{\sum_{i=0}^n a_i p^i}, \quad (3.5)$$

де p – комплексна змінна – параметр перетворення Лапласа.

Ґрунтуючись на інформації, яка наведена в першому розділі у вигляді аналізу робіт, присвячених розробці моделей, а також експериментальним дослідженням, які виконані автором даної роботи, характер протікання припрацювання в трибосистемах можна представити у вигляді наступних перехідних характеристик.

Для трибосистем, які функціонують в умовах граничного навантаження, крива швидкості зношування під час припрацювання має вигляд, як представлено на рис. 3.2. У початковий момент часу, при $t = 0$, $I(t) = 0$. При $t > 0$ відбувається швидке зростання швидкості зношування, для деяких конструкцій трибосистем протягом декількох хвилин, а потім плавне зниження за експоненціальним законом до величини I_{cm} , яку можна розрахувати за формулою (3.1).

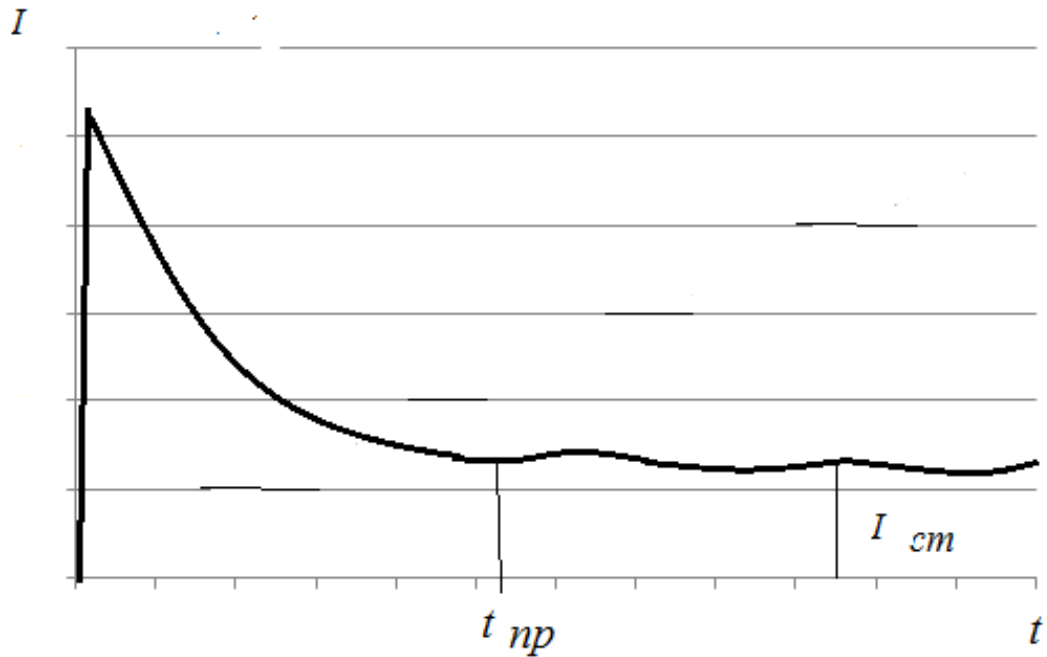


Рис. 3.2 – Характер зміни швидкості зношування трибосистеми в процесі припрацювання: t_{np} - час припрацювання; I_{cm} - швидкість зношування після завершення припрацювання

Характер зміни коефіцієнта тертя трибосистем представлений на рис.3.3, де крива 1 характеризує трибосистеми з добрими властивостями до припрацювання, а крива 2 – трибосистеми з поганими властивостями до припрацювання, при цьому $t_{np1} < t_{np2}$; $f_{cm1} < f_{cm2}$.

Розглядаючи фізику перехідних процесів моделювання швидкості зношування в процесі припрацювання, рис. 3.2 і коефіцієнта тертя, рис. 3.3, слід зазначити, що наведені залежності перехідного процесу в трибосистемах відповідають інерційним коливальним ланкам другого порядку.

Структурно-динамічну схему моделювання перехідного процесу швидкості зношування представимо в наступному вигляді, рис.3.4.

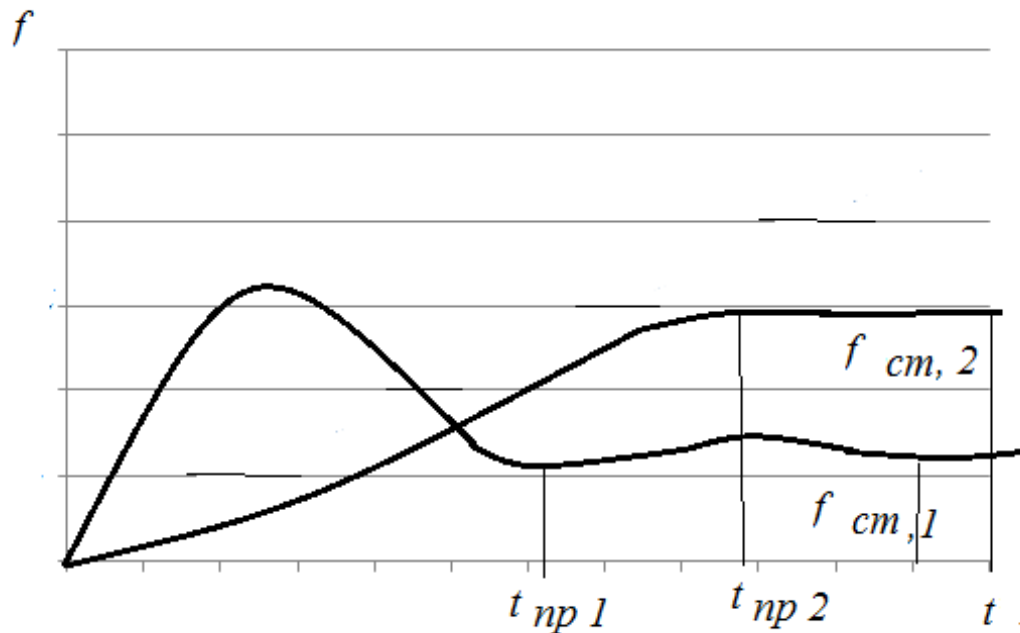


Рис. 3.3 – Характер зміни коефіцієнта тертя трибосистеми в процесі припрацювання: t_{np} – час припрацювання; f_{cm} – коефіцієнт тертя після завершення припрацювання; 1 – трибосистеми з добрими властивостями до припрацювання; 2 – трибосистеми з поганими властивостями до припрацювання

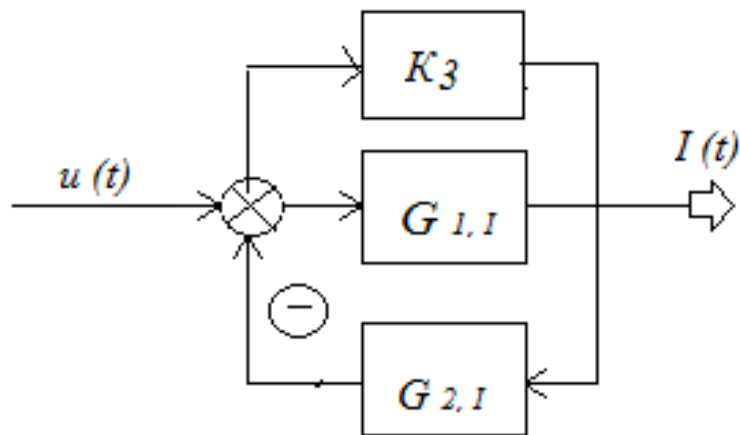


Рис. 3.4 – Структурно-динамічна схема моделювання перехідного процесу швидкості зношування

Передавальна функція K_3 враховує значення швидкості зношування трибосистеми на стаціонарному режимі, після завершення припрацювання.

Передавальна функція $G_{1,I}$ враховує реакцію трибосистеми на вплив вхідного сигналу $u(t)$, коли швидкість зношування в початковий період часу максимальна, а потім зменшується до сталого значення, як відображено на рис. 3.2. Це пов'язано з пластичною деформацією шорсткостей поверхонь тертя, яка в процесі припрацювання переходить в пружну, зміцненням поверхневих шарів, вирівнюванням градієнта температур в трибоелементах по всьому об'єму.

Передавальна функція відповідає реальній ланці диференціювання (з затримкою) $G_{1,I}$, яку можна записати у вигляді [173 - 177]:

$$G_{1,I} = \frac{K_1 P}{T_1 P + 1}, \quad (3.6)$$

де K_I – коефіцієнт підсилення, який враховує ступінь впливу вхідного сигналу на величину вихідного сигналу;

T_I – постійна часу трибосистеми, яка враховує інерційні властивості вирівнювання температури по товщині матеріалу трибоелемента;

P – оператор диференціювання, застосовується замість знака диференціювання d/dt .

Передавальна функція $G_{2,I}$, яка включена в схему у вигляді негативного зворотного зв'язку, враховує здатність трибосистеми до припрацювання і залежить від перебудови поверхневих шарів матеріалів, з яких виготовлені трибоелементи. Таку функцію можна описати інерційною ланкою [173-177]:

$$G_{2,I} = \frac{K_2}{T_2 P + 1}, \quad (3.7)$$

де K_2 – коефіцієнт підсилення, який враховує ступінь впливу вхідного сигналу $u(t)$ на перебудову структури матеріалу в поверхневих шарах трибоелементів;

T_2 – постійна часу, яка враховує час перебудови структури матеріалу в поверхневих шарах трибоелементів.

Структурно-динамічна схема відображає не функціональне призначення і конструктивний взаємозв'язок в трибосистемі, а математичні операції, які

здійснюються при передачі вхідного сигналу (u) через динамічні ланки і властивості трибосистеми в цілому.

Застосовуючи методи теорії ідентифікації динамічних об'єктів можна отримати еквівалентну передавальну функцію для моделювання швидкості зношування в трибосистемах під час перехідного процесу (припрацювання):

$$G_I = \frac{G_{1,I}}{1 + G_{1,I} \cdot G_{2,I}} + K_3 = \frac{\frac{K_1 P}{T_1 P + 1}}{1 + \frac{K_1 \cdot K_2 P}{(T_1 P + 1)(T_2 P + 1)}} + K_3. \quad (3.8)$$

Після перетворення формули (3.8) отримаємо:

$$G_I = \frac{K_1 T_2 P^2 + K_1 P}{T_1 T_2 P^2 + (T_1 + T_2 + K_1 K_2) P + 1} + K_3. \quad (3.9)$$

Зробимо заміну у виразі (3.9).

Постійну часу трибосистеми для моделювання швидкості зношування представимо наступною формулою:

$$T_I = \sqrt{T_1 \cdot T_2}. \quad (3.10)$$

Декремент загасання коливань після завершення припрацювання представимо наступною формулою:

$$d_I = \frac{(T_1 + T_2 + K_1 K_2)}{2 \cdot T_I}. \quad (3.11)$$

Відповідне рівняння динаміки перехідного процесу для моделювання швидкості зношування запишемо на підставі передавальної функції (3.9):

$$(T_I^2 P^2 + 2d_I T_I P + 1) + K_3 = (K_1 T_2 P^2 + K_1 P), \quad (3.12)$$

Рівняння динаміки перехідного процесу для моделювання швидкості зношування трибосистеми можна записати у вигляді диференційного рівняння в натуральних змінних:

$$T_I^2 \frac{d^2 I}{dt^2} + 2d_I T_I \frac{dI}{dt} + I + K_3 = K_1 T_2 \frac{d^2 W}{dt^2} + K_1 \frac{dW}{dt} \quad (3.13)$$

Права частина диференційного рівняння (3.13) містить першу і другу похідну вхідного сигналу W , який розраховується за формулою (3.3).

Коефіцієнт K_I при вхідному сигналі в теорії ідентифікації називають коефіцієнтом підсилення. Коефіцієнт K_I показує, як сильно вхідний сигнал W впливає на вихідний – величину швидкості зношування.

Ліва частина рівняння – це реакція трибосистеми на вхідний сигнал W .

Постійна часу трибосистеми T_I має розмірність часу і характеризує інерційність процесів, що протікають в трибосистемі під час припрацювання.

Збільшення постійних часу T_1 і T_2 , робить процес менш сприйнятливим до зміни вхідного сигналу, процес припрацювання збільшується в часі, а значення швидкості зношування на стаціонарному режимі після завершення припрацювання збільшується.

Декремент загасання d_I трибосистеми або коефіцієнт демпфірування характеризує наявність або відсутність коливального процесу. При значеннях $d_I > 0,7$, перехідний процес не має коливань [173-177]. Чим більше d_I , тим повільніше стає перехідний процес. При значеннях $d_I < 0,7$ перехідний процес має коливання.

Рішенням для наведеного вище диференційного рівняння (3.13) є такий вираз:

$$I(t) = I_{cm} \left[K_1 e^{\frac{-d_I t}{T_I}} \cdot (\cos \nu_I t + A_I \sin \nu_I t) \right] + I_{cm}, \quad (3.14)$$

де I_{cm} – значення швидкості зношування трибосистеми після завершення припрацювання (стаціонарний режим), визначається за виразом (3.1);

ν_I – частота коливань швидкості зношування після завершення припрацювання;

$$\nu_I = \frac{\sqrt{1 - d_I^2}}{T_I}. \quad (3.15)$$

Величина відхилення швидкості зношування від поточного значення під час коливального процесу:

$$A_I = \frac{d_I}{\sqrt{1-d_I^2}}. \quad (3.16)$$

Структурно-динамічну схему моделювання перехідного процесу коефіцієнта тертя представимо в наступному вигляді, рис.3.5.

Передавальна функція $G_{1,f}$ враховує інерційні властивості трибосистеми, які пов'язані з вирівнюванням температури в трибоелементах по всьому об'єму, формування оптимальної шорсткості поверхонь тертя і зміцнення поверхневого шару на деяку глибину. Передавальну функцію інерційної ланки $G_{1,f}$ можна записати у вигляді [173-177]:

$$G_{1,f} = \frac{K_1}{T_1 P + 1}, \quad (3.17)$$

де величини K_1, T_1, P - величини, аналогічні наведеним вище.

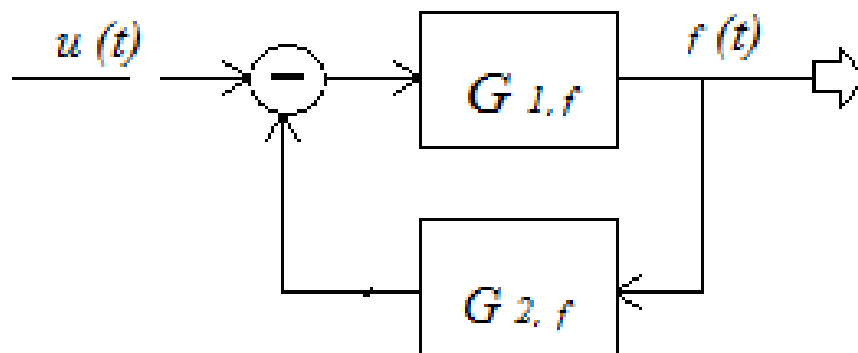


Рис. 3.5 – Структурно-динамічна схема моделювання перехідного процесу коефіцієнта тертя

Передавальна функція $G_{2,f}$, яка включена в схему у вигляді негативного зворотного зв'язку, враховує здатність трибосистеми до припрацювання і залежить від перебудови поверхневих шарів матеріалів, з яких виготовлені трибоелементи. Таку функцію можна описати інерційною ланкою [173-177]:

$$G_{2,f} = \frac{K_2}{T_2 P + 1}, \quad (3.18)$$

де K_2, T_2, P – величини, аналогічні наведеним вище.

Застосовуючи методи теорії ідентифікації динамічних об'єктів можна отримати еквівалентну передавальну функцію для моделювання коефіцієнта тертя в трибосистемах під час перехідного процесу (припрацювання):

$$G_f = \frac{G_{1,f}}{1 + G_{1,f} \cdot G_{2,f}} = \frac{\frac{K_1}{T_1 P + 1}}{1 + \frac{K_1 \cdot K_2}{(T_1 P + 1)(T_2 P + 1)}}. \quad (3.19)$$

Після перетворення виразу (3.19) отримаємо:

$$G_f = \frac{\frac{T_2}{K_2} P + \frac{1}{K_2}}{\frac{T_1 T_2}{K_1 K_2} P^2 + \frac{(T_1 + T_2)}{K_1 K_2} P + \frac{(K_1 K_2 + 1)}{K_1 K_2}}. \quad (3.20)$$

Зробимо заміну в (3.20).

Постійну часу трибосистеми для моделювання коефіцієнта тертя представимо наступною формулою:

$$T_f = \sqrt{\frac{T_1 \cdot T_2}{K_1 \cdot K_2}}, \quad (3.21)$$

Декремент загасання коливань після завершення припрацювання представимо наступною формулою:

$$d_f = \frac{(T_1 + T_2)}{2 \cdot T_f \cdot K_1 \cdot K_2}, \quad (3.22)$$

Відповідне рівняння динаміки перехідного процесу для моделювання коефіцієнта тертя запишемо на підставі передавальної функції (3.20):

$$\left(T_f^2 P^2 + 2d_f T_f P + 1 + \frac{1}{K_1 K_2} \right) = \left(\frac{T_2}{K_2} P + \frac{1}{K_2} \right). \quad (3.23)$$

Рівняння динаміки перехідного процесу для моделювання коефіцієнта тертя трибосистеми можна записати у вигляді диференційного рівняння в натуральних змінних:

$$T_f^2 \frac{d^2 f}{dt^2} + 2d_f T_f \frac{df}{dt} + f + \frac{f}{K_1 K_2} = \frac{T_2}{K_2} \frac{dW}{dt} + \frac{W}{K_2}. \quad (3.24)$$

Рішенням для наведеного вище диференційного рівняння (3.24) є такий вираз:

$$f(t) = f_{cm} \left[1 - e^{\frac{-d_f}{T_f} t} \cdot (\cos \nu_f t + A_f \sin \nu_f t) \right], \quad (3.25)$$

де f_{cm} – стале значення коефіцієнта тертя трибосистеми після завершення припрацювання, визначається за виразом (3.2);

ν_f – частота коливань коефіцієнта тертя після завершення припрацювання;

$$\nu_f = \frac{\sqrt{1 - d_f^2}}{T_f}. \quad (3.26)$$

Величина відхилення коефіцієнта тертя від поточного значення під час коливального процесу:

$$A_f = \frac{d_f}{\sqrt{1 - d_f^2}}. \quad (3.27)$$

Отримані рішення диференційних рівнянь (3.14) і (3.25) дозволяють виконувати моделювання перехідного процесу в трибосистемах в процесі припрацювання. Отримання таких рішень є результатом структурної ідентифікації трибосистеми. Як випливає з виду диференційних рівнянь, перехідний процес швидкості зношування та коефіцієнта тертя в трибосистемі описується коливальними ланками другого порядку. Аналіз рівнянь дозволив встановити, що на динаміку перехідного процесу в трибосистемі впливає прискорення і швидкість наростання вхідного впливу W .

Характер протікання перехідного процесу після застосування до трибосистеми вхідного впливу (W) залежить від коефіцієнтів підсилення K_1 і K_2 , постійних часу T_1 і T_2 , а також значень декременту загасання d_1 і d_f . Можна

припустити, що числові значення K_i , T_i , d_i залежать від конструкції трибосистеми, матеріалів трибоелементів, мастильного середовища, навантаження і швидкості ковзання.

3.2 Параметрична ідентифікація динамічної моделі перехідних процесів в трибосистемах

У попередньому підрозділі 3.1 отримана динамічна модель зміни швидкості зношування і коефіцієнта тертя в процесі припрацювання. Однак використовувати дані моделі для моделювання процесу припрацювання в трибосистемах важко, тому що невідомі значення коефіцієнтів K_1 і K_2 , а також значення постійних часу T_1 і T_2 .

Метою параметричної ідентифікації є визначення виразів для розрахунку наведених вище коефіцієнтів і постійних часу, щоб при підстановці їх в рівняння (3.13) і (3.24) права і ліва частина відрізнялися найменшим чином.

Як зазначалося в першому розділі даної роботи, базовим підходом до визначення параметрів динамічної моделі є метод найменших квадратів (МНК). Поряд з МНК існують інші методи параметричної ідентифікації, наприклад, методи імовірнісного підходу, оцінка максимальної правдоподібності, алгоритми стохастичної апроксимації, байесовської оцінки та ін. [173-177].

При вирішенні завдань тертя і зношування часто застосовують методичний підхід теорії подібності та моделювання, де для отримання безрозмірних критеріїв подібності застосовують методи аналізу розмірностей. Аналізуючи розмірні фактори, які впливають на процес, але при цьому не залежать один від одного, можна отримати безрозмірні критерії (коефіцієнти), які адекватно описують процес у подібних (різних за розмірами і конструкцією) фізичних об'єктів.

Процедурою параметричної ідентифікації або знаходження виразів для розрахунку K_1 , K_2 , T_1 , T_2 , які характеризують динаміку процесу припрацювання

трибосистем, є експериментальний матеріал, який дозволяє вибрати найбільш значимі фактори, які впливають на процес припрацювання.

До таких факторів належать:

1. Напруження на фактичних плямах контакту $\sigma_{фнк}$, Па. Залежить від навантаження на трибосистему N , Н, модуля пружності і величини шорсткості контактуючих матеріалів трибоелементів. Розраховується за формулами, наведеними в роботі [170].

2. Швидкість деформації в рухомому $\dot{\epsilon}_p$ і нерухомому $\dot{\epsilon}_n$, трибоелементах, $1/с$. Залежить від навантаження N , Н, швидкості ковзання $v_{ков}$, м/с, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона контактуючих матеріалів трибоелементів. Розраховується за формулами, наведеними в роботі [170].

3. Коефіцієнт форми трибосистеми K_ϕ , $1/м$, враховує площі тертя і об'єми, розташовані під площами тертя у рухомого і нерухомого трибоелементів. Розраховується за формулою, наведеною в роботі [163].

4. Коефіцієнт температуропровідності a , $м^2/с$, враховує температуропровідність матеріалів рухомого a_p і нерухомого a_n трибоелементів. Довідкова величина.

5. Трибологічні властивості мастильного середовища E_y , Дж/м³, визначаються на чотирьохкульковій машині тертя і враховують протизносні і протизадирні властивості мастильних матеріалів. Значення для різних мастильних матеріалів представлені в роботі [166].

6. Реологічні властивості структури матеріалів рухомого δ_p і нерухомого δ_n трибоелементів. Безрозмірна величина, враховує внутрішнє тертя структури матеріалу. Значення внутрішнього тертя для сталей, чавунів, бронз представлено в роботі [164].

7. Менша площа тертя одного з трибоелементів, F_{min} , м².

8. Об'єми матеріалу, які розташовані під площами тертя у рухомого V_p , м³ та нерухомого V_n , м³ трибоелементів.

9. Глибина деформації поверхневих шарів матеріалу рухомого h_{dp} , м і нерухомого h_{dn} , м трибоелементів. Розраховується за формулами, наведеними в роботі [170].

10. Об'єм матеріалу рухомого V_{dp} і нерухомого V_{dn} трибоелементів, м³, який бере участь в деформації в процесі тертя. Розраховується за формулами:

$$V_{dp} = F_{\max} \cdot h_{dp}, \text{ м}^3, \quad (3.28)$$

$$V_{dn} = F_{\min} \cdot h_{dn}, \text{ м}^3, \quad (3.29)$$

де F_{\max} – більша площа тертя одного з трибоелементів.

В роботі [171] запропонована фізична величина – добротність трибосистеми Q , яка оцінюється за формулою:

$$Q = E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж / м}^3. \quad (3.30)$$

Добротність трибосистеми враховує трибологічні властивості мастильного середовища E_y і внутрішнє тертя структури матеріалів рухомого δ_p і нерухомого δ_n трибоелементів. Дана фізична величина не враховує геометричні розміри трибосистеми, які можна виразити у вигляді коефіцієнта форми K_ϕ , який розраховується за формулою:

$$K_\phi = \frac{F_{\min}}{V_p + \frac{V_n \cdot F_{\max}}{F_{\min}}}, \frac{1}{\text{м}}. \quad (3.31)$$

Значущими параметрами також є: температуропровідність матеріалів трибоелементів a , м²/с і швидкість деформації в даних матеріалах $\dot{\epsilon}$, 1/с. З огляду на те, що в трибосистемі одночасно беруть участь в роботі рухомий і нерухомий трибоелемент, використовуємо поняття приведених значень. Приведений коефіцієнт температуропровідності трибосистеми визначимо за виразом:

$$a_{np} = \frac{2a_p \cdot a_n}{a_p + a_n}, \text{ м}^2 / \text{с}. \quad (3.32)$$

Приведену швидкість деформації в поверхневих шарах матеріалів трибосистеми визначимо за виразом:

$$\dot{\varepsilon}_{np} = \frac{2\dot{\varepsilon}_p \cdot \dot{\varepsilon}_n}{\dot{\varepsilon}_p + \dot{\varepsilon}_n}, 1/c, \quad (3.33)$$

де на підставі роботи [170]:

$$\dot{\varepsilon}_p = 75(1 + \mu_p)(0,86 - 1,05\mu_p) \frac{\sigma_{фнк} \cdot v_{ков}}{E_p \cdot d_{фнк}}, \quad (3.34)$$

$$\dot{\varepsilon}_n = 75(1 + \mu_n)(0,86 - 1,05\mu_n) \frac{\sigma_{фнк} \cdot v_{ков}}{E_n \cdot d_{фнк}}, \quad (3.35)$$

де μ_p и μ_n – коефіцієнти Пуассона матеріалів рухомого і нерухомого трибоелементів, довідкова величина;

E_p і E_n – модуль пружності матеріалів рухомого і нерухомого трибоелементів, довідкова величина, Па;

$d_{фнк}$ – діаметр фактичної плями контакту, м, розраховується за формулою, яка представлена в роботі [170].

З урахуванням викладених доповнень добротність трибосистеми можна оцінити за виразом:

$$Q = \frac{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y}{\dot{\varepsilon}_{np}} \cdot \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}, Дж / м^3. \quad (3.36)$$

Наведений вираз добротності трибосистеми, на відміну від відомого (3.30), враховує:

- геометричні розміри трибосистеми, які впливають на час припрцювання;
- температуропровідність матеріалів трибоелементів, яка впливає на рівень температурних напружень в поверхневих шарах;
- швидкість поширення деформації в поверхневих шарах матеріалу трибоелементів, яка впливає на ступінь релаксації напружень.

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

Коефіцієнт підсилення K_I , який входить в диференційні рівняння і їх рішення, в теорії ідентифікації динамічних об'єктів називають коефіцієнтом,

який оцінює ступінь впливу вхідного сигналу на вихідний. Грунтуючись на такому фізичному понятті і використовуючи методи розмірностей теорії подібності та моделювання, отримаємо вираз:

$$K_1 = \frac{\sigma_{фнк}}{Q} = \frac{\sigma_{фнк} \cdot \dot{\varepsilon}_{np}}{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}} \quad (3.37)$$

Як випливає з виразу (3.37), відношення напруження на плямах фактичного контакту $\sigma_{фнк}$ до добротності трибосистеми Q оцінює чутливість трибосистеми до зовнішніх впливів. Чим більше чутливість трибосистеми, тим більше буде «підвищення» швидкості зношування і коефіцієнта тертя в процесі припрацювання від сталих значень, які характерні для трибосистеми після завершення припрацювання.

Для зменшення чутливості трибосистем до зовнішніх впливів необхідно збільшувати добротність трибосистеми. Аналіз виразу (3.36) дозволяє сформулювати шляхи підвищення добротності під час припрацювання.

1. Збільшення коефіцієнта форми трибосистеми K_ϕ , який визначається за формулою (3.31). Для цього необхідно зменшувати об'єми матеріалу, які розташовані під площами тертя рухомого V_p і нерухомого V_n трибоелементів. Дану вимогу найкраще виконувати зменшенням товщини матеріалів, що сприяє швидкому вирівнюванню температур по глибині трибоелементів. Даний параметр входить в формулу в другому ступені, а отже, ступінь його впливу вище, ніж інших.

2. Збільшення температуропровідності матеріалів трибоелементів. Висока температуропровідність виключає виникнення температурних напруг в поверхневих шарах матеріалів трибоелементів.

3. Збільшення трибологічних властивостей мастильного середовища. Наявність в мастильних матеріалах поверхнево-активних речовин (ПАР), а також протизносних і протизадирних присадок сприятиме формуванню зносостійких плівок на поверхні матеріалів трибоелементів.

4. Збільшення реологічних властивостей структури сполучених матеріалів, що виявляється в здатності структури матеріалів перетворювати механічні коливання в теплову енергію і розсіювати її в навколишнє середовище.

Коефіцієнт K_1 , який характеризує чутливість трибосистеми до зовнішніх збурень, є безрозмірним коефіцієнтом.

Коефіцієнт K_2 характеризує зниження ступеня впливу вхідного сигналу на реакцію трибосистеми, це випливає з диференційного рівняння (3.24). Отже, фізичний зміст коефіцієнта K_2 – це здатність трибосистеми до припрацювання, безрозмірна величина.

На підставі аналізу розмірностей запишемо вираз для визначення коефіцієнта K_2 :

$$K_2 = \frac{Q \cdot a_{np} \cdot d_{фнк}}{W_{тр}} = \frac{K_{\phi}^2 \cdot a_{np}^2 \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} \cdot d_{фнк}}{\dot{\epsilon}_{np} \cdot (W_p + W_n)}, \quad (3.38)$$

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

W_p и W_n – швидкість роботи дисипації в рухомому і нерухомому трибоелементах трибосистеми, Дж/с.

Діаметр фактичного плями контакту $d_{фнк}$ залежить від навантаження N , модуля пружності контактуючих матеріалів і величини шорсткості поверхонь тертя. Розраховується згідно формул, які наведені в роботі [170].

Швидкість роботи дисипації в рухомому і нерухомому трибоелементах розраховується за формулами роботи [170]:

$$W_p = \sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_p \cdot V_{др}, \quad (3.39)$$

$$W_n = \sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_n \cdot V_{дн}. \quad (3.40)$$

Аналіз виразу (3.38) дозволяє визначити шляхи поліпшення здатності до припрацювання трибосистем.

1. Збільшення добротності трибосистеми. Шляхи збільшення сформульовані вище.

2. Збільшення діаметра фактичної плями контакту. Ефективним способом є зменшення шорсткості поверхонь тертя Ra .

3. Зменшення швидкості роботи дисипації в трибоелементах. Згідно виразів (3.39) і (3.40) це можна виконати наступними шляхами:

– зниженням напруження на фактичних плямах контакту шляхом зменшення шорсткості поверхонь тертя Ra ;

– зниженням швидкості деформації в матеріалах трибоелементів, наприклад, збільшенням модулів пружності матеріалів і діаметра фактичної плями контакту, формули (3.34) і (3.35);

– зниженням об'єму матеріалу поверхневого шару трибоелементів, які беруть участь в деформації, наприклад, застосуванням мастильного середовища з великим значенням E_y , тобто з вмістом ПАР і присадок.

Об'єми деформованого матеріалу розраховуються за формулами (3.28) і (3.29), де глибина поширення деформації визначається за виразами, які наведені в роботі [170]:

$$h_{\partial p} = 0,5d_{\text{фнк}}(1 - e^{-D_p}), \quad (3.41)$$

де

$$D_p = \frac{6,5 \cdot 10^8 \cdot \sigma_{\text{фнк}}^2}{E_p \cdot E_y}, \quad (3.42)$$

$$h_{\partial n} = 0,5d_{\text{фнк}}(1 - e^{-D_n}), \quad (3.43)$$

де

$$D_n = \frac{6,5 \cdot 10^8 \cdot \sigma_{\text{фнк}}^2}{E_n \cdot E_y}. \quad (3.44)$$

Постійна часу T_l , яка входить в диференціальні рівняння динаміки процесу моделювання швидкості зношування (3.13) і коефіцієнта тертя (3.24) характеризує інерційність трибосистеми при зміні зовнішніх умов

(навантаження, швидкості ковзання, трибологічних властивостей мастильного середовища).

Фізичний сенс постійної часу T_1 – це час, який необхідно для стабілізації градієнта температур по всьому об'єму трибоелемента з урахуванням температуропровідності матеріалу при зміні зовнішніх умов, розмірність – секунда.

Використовуючи методи аналізу розмірностей теорії подібності та моделювання запишемо вираз для визначення T_1 :

$$T_1 = \frac{\pi \left(\sqrt[3]{V_{np}} \right)^2}{a_{np}} = \frac{\pi V_{np}^{0,666}}{a_{np}}, c, \quad (3.45)$$

де V_{np} – приведений об'єм матеріала трибосистеми, визначається за виразом:

$$V_{np} = \frac{2 \cdot V_p \cdot V_n}{V_p + V_n}, m^3. \quad (3.46)$$

Постійна часу T_1 входить в рішення диференціальних рівнянь і визначає час припрацювання. Зменшення T_1 сприятиме зменшенню часу припрацювання. Як впливає з виразу (3.45) для цього необхідно:

- зменшувати об'єм трибоелементів, наприклад, виконувати їх тонкостінними або застосовувати покриття або пластини на поверхнях тертя;
- збільшувати температуропровідність матеріалів трибоелементів.

Постійна часу T_2 , яка входить як в праву, так і в ліву частину диференціальних рівнянь, характеризує час, за який відбувається перебудова поверхневих шарів при зміні зовнішніх умов, розмірність – секунда. Це час, за який відбувається зміна шорсткості поверхневих шарів, процеси деформації і зміцнення поверхневих шарів.

Використовуючи методи аналізу розмірностей запишемо вираз для визначення T_2 :

$$T_2 = \frac{\kappa_{\phi} \cdot h_{\partial np}}{\dot{\epsilon}_{np}}, c, \quad (3.47)$$

де

$$h_{\text{днр}} = \frac{2 \cdot h_{\text{др}} \cdot h_{\text{дн}}}{h_{\text{др}} + h_{\text{дн}}}, \text{ м} . \quad (3.48)$$

Зменшення постійної часу T_2 сприяє зменшенню часу припрацювання трибосистеми. Такий висновок випливає з аналізу рішень диференціальних рівнянь динаміки процесів. Як випливає з виразу (3.47), для зменшення T_2 необхідно виконувати наступні заходи.

1. Зменшення коефіцієнта форми трибосистеми, тобто зміна конструкції трибосистеми. Малі значення коефіцієнта форми $K_\phi < 1$ відповідають вищим кінематичним парам, у яких контакт трибоелементів відбувається в точці або по лінії. Практика показує, що для таких трибосистем час припрацювання мінімальний (кілька хвилин). Нижчі кінематичні пари, у яких контакт відбувається по площі, а отже $K_\phi > 1 \dots 100$, час припрацювання максимальний, іноді кілька годин.

2. Зменшення глибини поширення деформації в поверхневих шарах. Як випливає з формул (3.41) – (3.44), на глибину деформації в матеріалах трибоелементів впливає:

– величина напруження на плямах фактичного контакту $\sigma_{\text{фнк}}$, яке необхідно зменшувати;

– модуль пружності матеріалів трибоелементів E_p, E_n , який необхідно збільшувати;

– трибологічні властивості мастильного середовища E_y , які необхідно збільшувати.

3. Збільшення швидкості деформації в поверхневих шарах трибоелементів. Шляхи збільшення $\dot{\epsilon}_p$ і $\dot{\epsilon}_n$ слідує з виразів (3.34) і (3.35). Аналіз даних виразів дозволяє зробити висновок, що величини $\sigma_{\text{фнк}}, E_p, E_n$ входять в протиріччя з раніше зробленими висновками. Отже величина T_2 матиме оптимальне значення для процесу припрацювання. Одним з параметрів, яким можна керувати величиною T_2 , це швидкість ковзання $v_{\text{ков}}$. Збільшення швидкості ковзання

призводить до збільшення швидкості деформації при заздалегідь обраних і незмінних умовах.

Отримані вирази для розрахунку параметрів динамічних моделей K_1 , K_2 , T_1 , T_2 дозволяють визначити декремент загасання коливань під час перехідного процесу. Для швидкості зношування – за виразом (3.11), для коефіцієнта тертя – за виразом (3.22).

Отримані вирази для визначення коефіцієнтів підсилення K_1 , формула (3.37), K_2 , формула (3.38), а також постійних часу T_1 , формула (3.45) і T_2 , формула (3.47), є результатом параметричної ідентифікації моделей динаміки перехідних процесів в трибосистемах. При їх підстановці в рішення диференціальних рівнянь швидкості зношування (3.14) і коефіцієнта тертя (3.25), можна моделювати процес припрацювання трибосистем для різних вхідних умов.

3.3 Результати моделювання процесу припрацювання трибосистем в умовах граничного мащення, оцінка похибки моделювання

Після виконання структурної і параметричної ідентифікацій динамічних моделей процесу припрацювання трибосистем необхідно виконати оцінку похибки моделювання, тобто перевірку результатів моделювання з експериментальними даними, які отримані для аналогічних конструкцій трибосистем при однакових вхідних параметрах. Таке порівняння будемо проводити на підставі експериментальних досліджень лабораторних трибосистем, які не відрізняються від трибосистем, на підставі яких виконано моделювання.

Структурна схема оцінки похибки моделювання за результатами лабораторних експериментальних досліджень трибосистем представлена на рис.3.6.

При оцінці точності моделювання, тобто адекватності моделі експериментальним даним, на вхід системи подавався вхідний сигнал $u(t)$, який

враховував конструкцію трибосистеми, трибологічні властивості мастильного середовища, матеріали, з яких виготовлені трибоелементи, їх температуропровідність, реологічні властивості, а також навантаження і швидкість ковзання. Отримані експериментальні результати у вигляді вихідного сигналу $y_{екс}(t)$, порівнювалися з результатами моделювання $y_{м}(t)$.

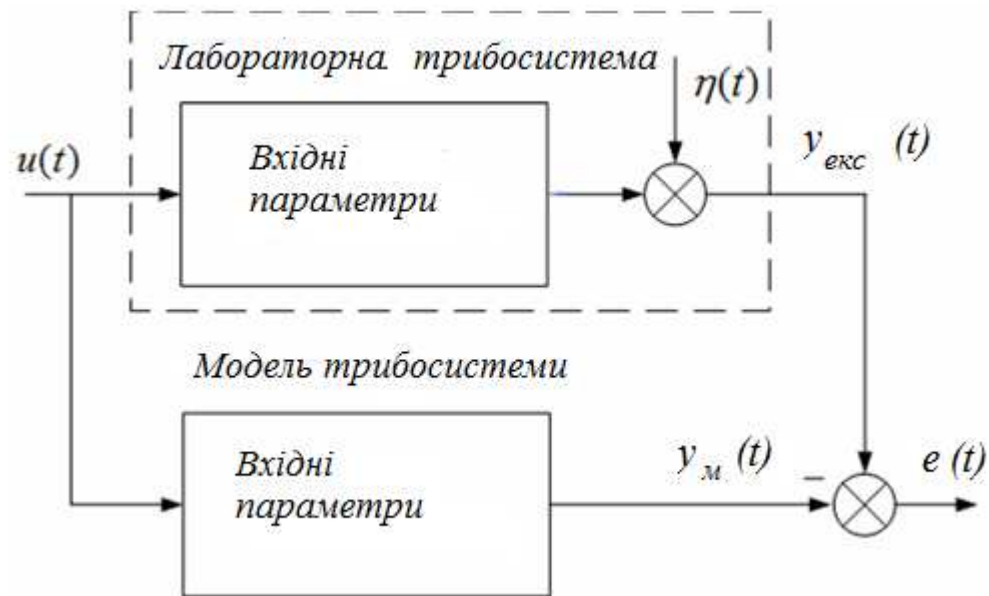


Рис. 3.6 – Структурна схема оцінки похибки моделювання за результатами лабораторних експериментальних досліджень: $u(t)$ - вхідний вплив на трибосистему; $\eta(t)$ - неконтрольований випадковий вплив; $y_{екс}(t)$ - вихідний сигнал (результати експерименту); $y_{м}(t)$ - вихідний сигнал (результати моделювання); $e(t)$ - різниця (похибка) між результатами експерименту і моделювання

За результатами порівняння розраховувалася різниця (похибка) моделювання:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{екс}(t) - y_{м}(t))^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^2(t), \quad (3.49)$$

де n – кількість експериментів (повторів);

$e(t)$ – похибка моделювання.

Середньоквадратичне відхилення похибки моделювання в будь-якій точці процесу представимо формулою:

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^2}. \quad (3.50)$$

Відносну похибку моделювання в будь-якій точці перехідного процесу визначимо за виразами:

$$e_I = \left| \frac{I_{екс} - I_M}{I_{екс}} \right| \cdot 100\%, \quad (3.51)$$

$$e_f = \left| \frac{f_{екс} - f_M}{f_{екс}} \right| \cdot 100\%, \quad (3.52)$$

де $I_{екс}$, I_M , $f_{екс}$, f_M – значення швидкості зношування і коефіцієнта тертя, які виміряні в процесі експерименту і отримані при моделюванні.

Відносну похибку часу завершення припрацювання визначаємо за виразом:

$$e_t = \left| \frac{t_{np,екс} - t_{np,м}}{t_{np,екс}} \right| \cdot 100\%, \quad (3.53)$$

де $t_{np,екс}$, $t_{np,м}$ – час завершення припрацювання за результатами експерименту та моделювання.

Результати моделювання процесу припрацювання трибосистеми: сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 представлені на рис.3.7 і 3.8. Параметри трибосистеми: коефіцієнт форми $K_\phi = 12,5$ 1/м; початкова шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,2$ мкм; навантаження $N = 600$ Н; швидкість ковзання $v_{ков} = 0,5$ м/с.

В якості фактора, що змінюється, було обрано:

- гідравлічна олива МГП – 10, ($E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$ Дж/м³);
- моторна олива М – 10Г_{2к}, ($E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³);
- моторна олива ESSO ULTRON SL/CF, ($E_y = 7,2 \cdot 10^{14}$ Дж/м³).

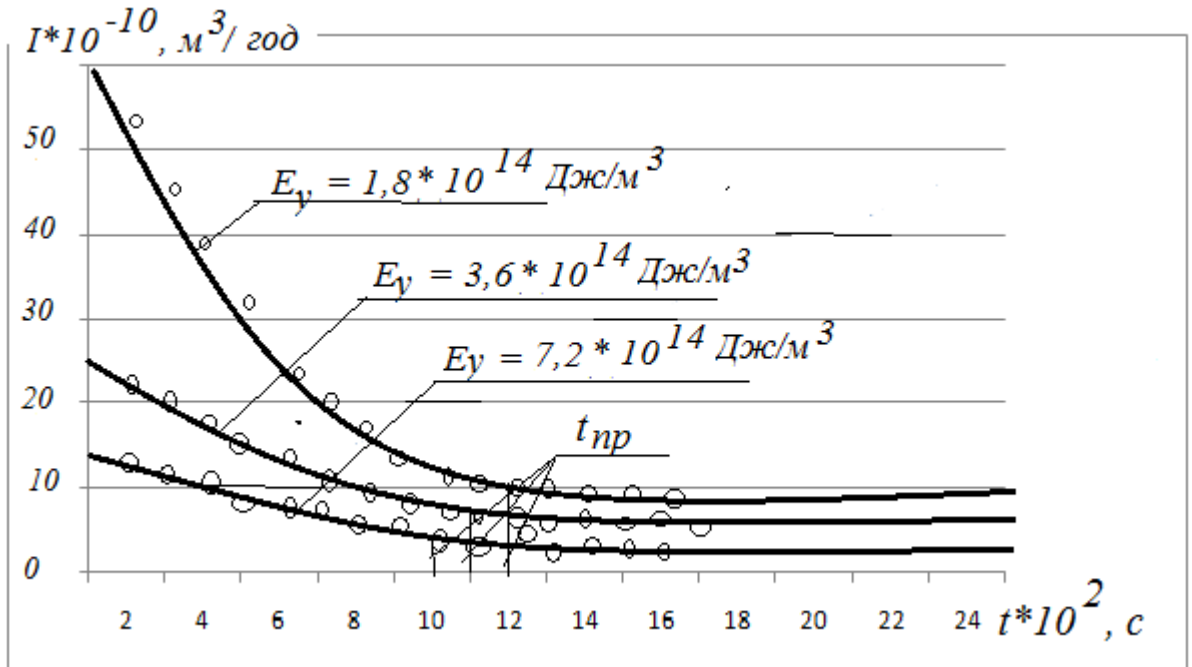


Рис. 3.7 – Залежності зміни швидкості зношування в процесі припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 при зміні трибологічних властивостей мастильного середовища E_y .

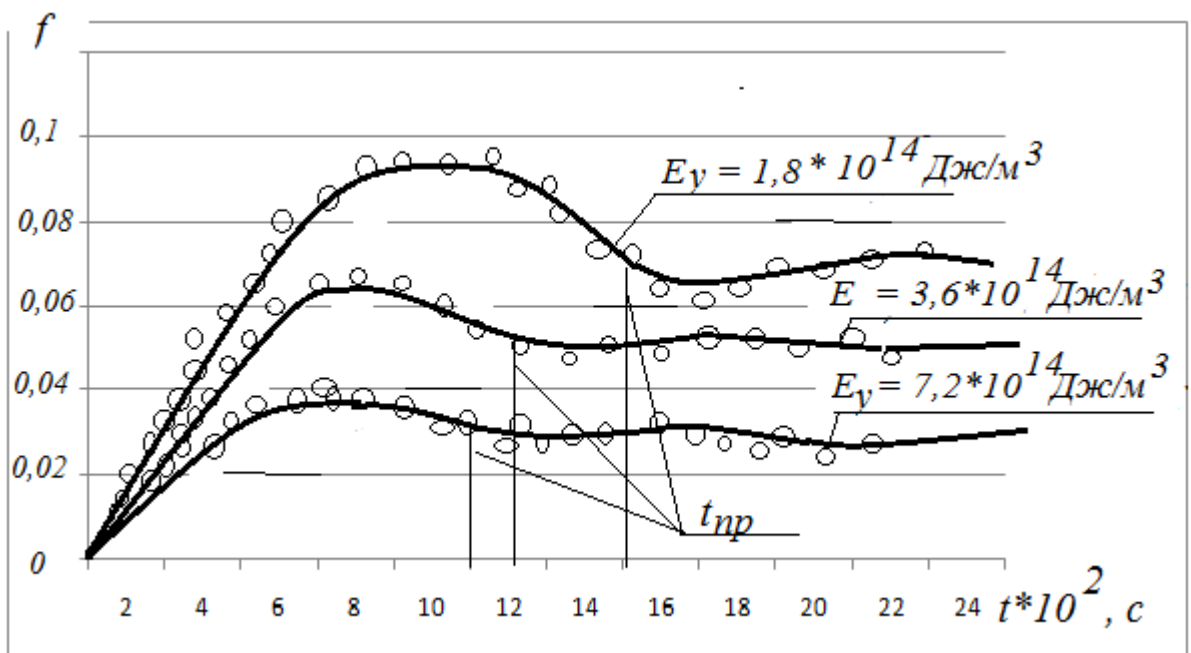


Рис. 3.8 – Залежності зміни коефіцієнта тертя в процесі припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 при зміні трибологічних властивостей мастильного середовища E_y .

Характер перехідних характеристик для швидкості зношування представлений на рис. 3.7, для коефіцієнта тертя, на рис. 3.8. Як впливає з отриманих залежностей перехідний процес для швидкості зношування проходить без коливань ($d_I = 0,75 \dots 1,02$), а для коефіцієнта тертя характерні коливання після завершення припрацювання ($d_f = 0,42 \dots 0,54$). Збільшення трибологічних властивостей мастильного середовища від $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$ Дж/м³ до $E_y = 7,2 \cdot 10^{14}$ Дж/м³ сприяє зниженню максимальних значень швидкості зношування і коефіцієнта тертя, а також зменшенню часу припрацювання t_{np} .

Представлені залежності дозволяють зробити висновок, що застосування змащувальних матеріалів з великими значеннями E_y призводить до зниження максимальних значень I_{max} і f_{max} , а також до зниження часу припрацювання. При цьому, за параметром швидкості зношування трибосистеми припрацьовуються за менший час $t_{np} = 900 \dots 1100$ с, ніж за коефіцієнтом тертя $t_{np} = 1000 \dots 1400$ с. Процес зміни коефіцієнта тертя під час припрацювання є більш інерційним.

Отримані залежності процесу припрацювання трибосистем були перевірені експериментально. В процесі експерименту через кожні 100 секунд визначалися значення швидкості зношування і коефіцієнта тертя, а також час завершення припрацювання. За результатами трьох повторів визначали середнє значення параметрів, похибку моделювання за формулами (3.51) – (3.53), середньоквадратичне відхилення похибки, формула (3.50). Порівняння експериментальних результатів з результатами моделювання представлені в таблиці 3.1 – 3.3, а експериментальні точки нанесені на рис. 3.7 і рис. 3.8.

Таблиця 3.1 – Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, мастильне середовище $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{екс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_b, \%$	f_m	$f_{екс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	60,0	70,5	14,8	0,005	0,006	16,6
200	54,3	62,5	13,1	0,01	0,012	16,6
300	42,7	49,0	12,8	0,037	0,04	7,5

Продовження таблиці 3.1

400	34,2	38,5	11,1	0,044	0,05	12,0
500	25,7	23,5	9,36	0,071	0,075	5,3
600	20,2	18,5	9,2	0,08	0,086	6,9
700	15,3	13,5	13,3	0,09	0,095	5,2
800	12,4	11,5	7,8	0,093	0,10	7,0
900	10,6	9,5	11,5	0,093	0,11	15,4
1000	9,68	9,0	7,5	0,09	0,08	12,5
1100	9,3	10,0	7,0	0,085	0,08	6,2
1200	9,2	10,0	8,0	0,081	0,075	8,0
1300	9,44	10,5	10,0	0,077	0,072	6,9
1400	9,68	9,2	5,2	0,073	0,08	8,7
1500	9,95	9,2	8,1	0,071	0,075	5,3

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що похибка моделювання при зміні швидкості зношування перебуває в межах $e_I = 14,8 \dots 12,8\%$. При цьому більше значення відноситься до мастильного середовища з $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$ Дж/м³, а менше значення до мастильного середовища з $E_y = 7,2 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. При зміні коефіцієнта тертя похибка моделювання знаходиться в межах $e_f = 16,6 \dots 13,3\%$, при цьому великі значення похибки характерні для мастильного середовища з меншими трибологічними властивостями.

Таблиця 3.2 – Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

Час процесу припрацювання t, c	$I_M \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{екс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_b, \%$	f_m	$f_{екс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	24,1	27,7	12,9	0,0056	0,005	12,0
200	20,0	22,6	11,5	0,018	0,02	10,0
300	17,0	15,0	13,3	0,033	0,038	13,1
400	13,8	12,63	9,2	0,047	0,055	14,5
500	11,4	10,2	11,7	0,057	0,062	8,0
600	9,7	8,6	12,7	0,063	0,068	7,3
700	8,6	7,6	13,1	0,065	0,07	7,1
800	7,9	7,0	12,8	0,064	0,068	5,8

Продовження таблиці 3.2

900	7,54	6,8	10,8	0,061	0,067	8,9
1000	7,35	6,7	9,7	0,058	0,055	5,4
1100	7,27	6,6	10,1	0,055	0,05	10,0
1200	7,26	6,7	8,3	0,053	0,049	8,1
1300	7,27	6,8	6,9	0,052	0,05	4,0
1400	7,3	6,6	10,6	0,051	0,054	5,5
1500	7,3	6,8	7,3	0,052	0,056	7,1

Необхідно також відзначити, що на початку процесу припрацювання експериментальні значення швидкості зношування і коефіцієнта тертя більше, ніж отримані шляхом моделювання, а в кінці процесу, навпаки, експериментальні значення менше значень, отриманих шляхом моделювання.

Похибка моделювання часу завершення припрацювання становить $e_t = 15,5 \dots 16,0\%$. Таке велике значення можна пояснити коливаннями вхідних показників, які можуть відрізнятися в процесі експерименту.

Таблиця 3.3 – Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, мастильне середовище $E_y = 7,2 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10}, m^3/год$	$I_{екс} \cdot 10^{-10}, m^3/год$ (середнє значення)	$e_b, \%$	f_m	$f_{екс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	10,5	12,0	12,5	0,0053	0,006	11,6
200	8,54	10,0	14,6	0,0159	0,018	11,6
300	7,51	8,5	11,6	0,026	0,03	13,3
400	6,97	8,0	12,8	0,033	0,036	8,3
500	6,69	7,5	10,8	0,036	0,039	7,6
600	6,55	7,4	11,4	0,037	0,040	7,5
700	6,47	7,0	7,5	0,036	0,040	10,0
800	6,44	6,0	7,3	0,035	0,038	7,8
900	6,42	6,0	7,0	0,034	0,038	10,5
1000	6,41	5,8	10,5	0,033	0,03	10,0
1100	6,4	5,8	10,3	0,033	0,03	10,0
1200	6,4	5,9	8,4	0,033	0,03	10,0
1300	6,4	6,0	6,6	0,033	0,031	6,4
1400	6,4	5,9	8,4	0,033	0,03	10,0
1500	6,4	5,9	8,4	0,033	0,031	6,4

Характер процесу припрацювання трибосистем при зміні матеріалів, з яких виготовлені трибоелементи, представлений на рис. 3.9 і рис. 3.10. У розроблених моделях сумісність матеріалів враховується параметром $\sqrt{\delta_p \cdot \delta_n / \pi}$. Параметри, які не змінювалися в процесі експерименту і моделювання: мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³; $Ra = 0,2$ мкм; $N = 600$ Н; $v_{ков} = 0,5$ м/с; $K_\phi = 12,5$ 1/м.

Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + сталь 40X наведено в таблиці А1, додаток А, для трибосистеми сталь 40X + СЧ в таблиці А2, для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, в таблиці А3.

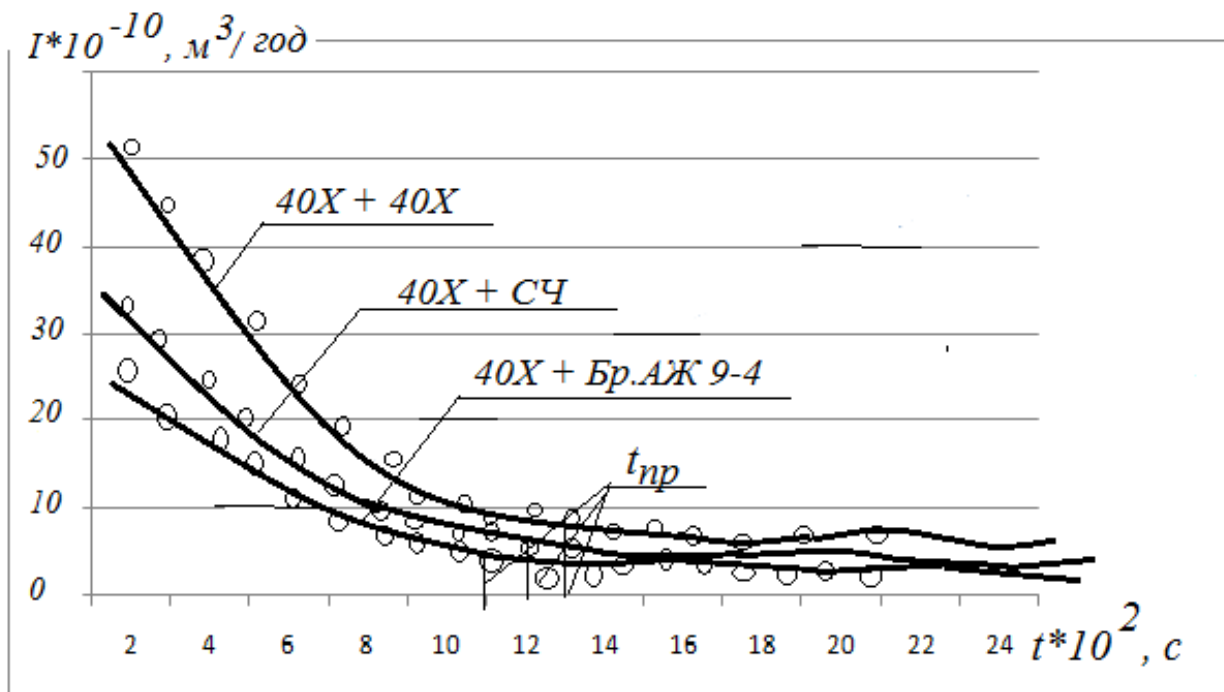


Рис. 3.9 – Залежності зміни швидкості зношування в процесі припрацювання трибосистем з різними сполученнями матеріалів, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

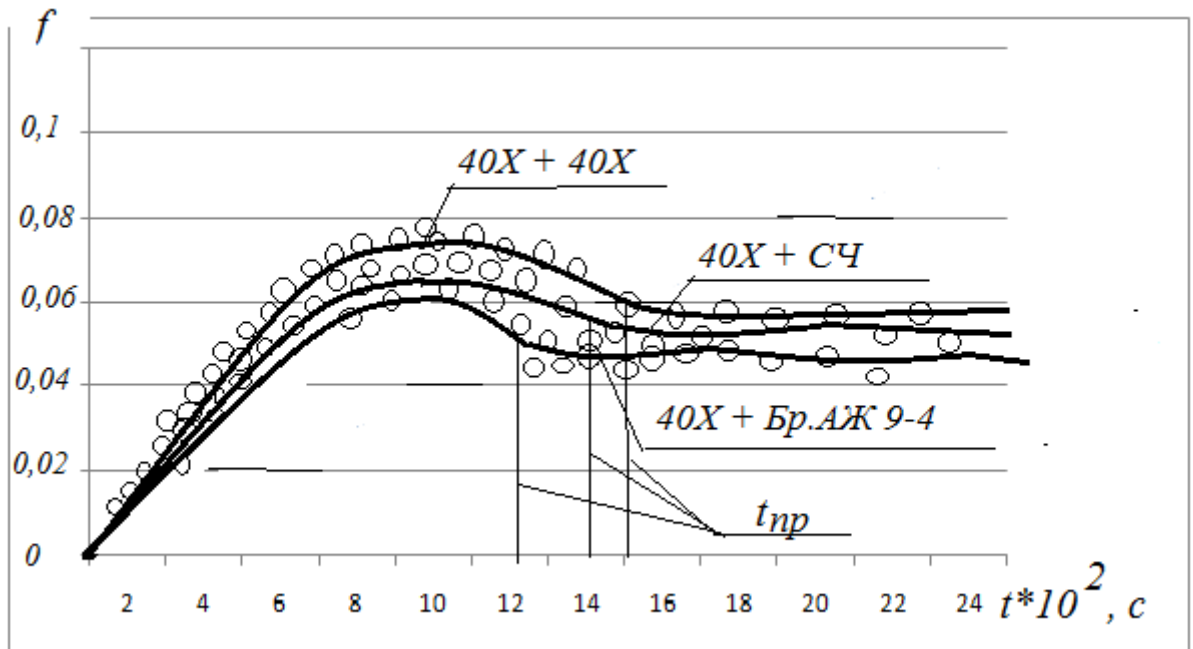


Рис. 3.10 – Залежності зміни коефіцієнта тертя в процесі припрацювання трибосистем з різним сполученням матеріалів, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$

Як випливає з аналізу залежностей рис. 3.9 і рис. 3.10, а також таблиць, максимальна похибка моделювання процесу припрацювання при зміні матеріалів трибоелементів становить: для швидкості зношування $e_t = 14,5 \dots 15,0 \%$, для коефіцієнта тертя $e_f = 15,1 \dots 16,6 \%$. Похибка моделювання часу завершення припрацювання становить $e_t = 15,4 \dots 16,2 \%$.

Час припрацювання для швидкості зношування становить $t_{np} = 1000 \dots 1200 \text{ с}$, а для коефіцієнта тертя $t_{np} = 1100 \dots 1400 \text{ с}$.

Характер зміни процесу припрацювання для різних конструкцій трибосистем, які оцінюються коефіцієнтом форми $K_\phi, 1/\text{м}$, формула (3.31), представлений на рис. 3.11 та рис. 3.12. Моделювання процесу припрацювання, а також експериментальна перевірка похибки моделювання виконувалися для трибосистеми сталь $40X + \text{Бр.АЖ}9 - 4$, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$, навантаження $N = 600 \text{ Н}$, швидкість ковзання $v_{ков} = 0,5 \text{ м/с}$, шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,2 \text{ мкм}$. В процесі експерименту варіювалися значення коефіцієнта форм $K_\phi = 6,06 \dots 23,6 \text{ } 1/\text{м}$.

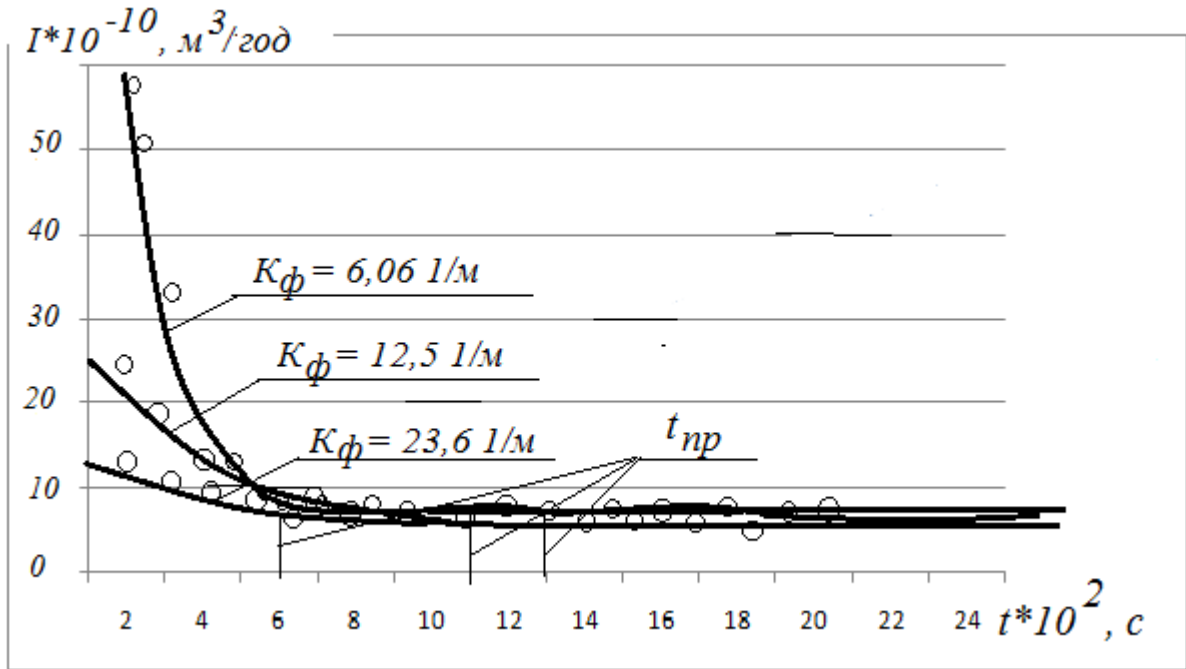


Рис. 3.11 – Залежності зміни швидкості зношування в процесі припрацювання для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 при зміні коефіцієнта форми K_ϕ , $E_y = 3,6 * 10^{14}$ Дж/м³

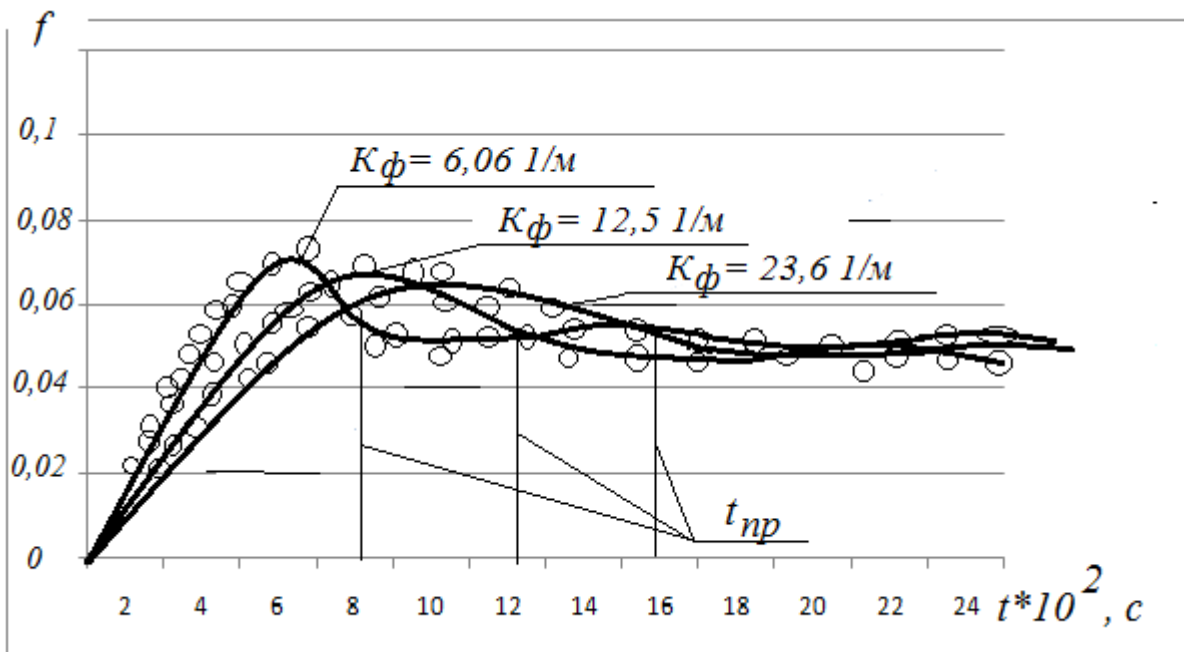


Рис. 3.12 – Залежності зміни коефіцієнта тертя в процесі припрацювання для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 при зміні коефіцієнта форми K_ϕ , $E_y = 3,6 * 10^{14}$ Дж/м³

Порівняння результатів моделювання і експерименту представлені в додатку А, таблиці А4, А5, А6.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що максимальна похибка моделювання швидкості зношування не перевищує значень $e_I = 13,3 \dots 15,3 \%$, а коефіцієнта тертя $e_f = 14,5 \dots 16,6 \%$. Як впливає з отриманих результатів, збільшення коефіцієнта форми призводить до збільшення похибки моделювання.

Час припрацювання значно залежить від K_ϕ . Для $K_\phi = 6,06$ 1/м середній час припрацювання за значенням швидкості зношування становить $t_{np} = 500$ с, а для коефіцієнта тертя $t_{np} = 700$ с. Похибка моделювання $e_I = 14,0 \dots 15,2 \%$.

Характер зміни процесу припрацювання трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4 в мастильному середовищі $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³ при навантаженні $N = 600$ Н, швидкості ковзання $v_{ков} = 0,5$ м/с, коефіцієнту форми $K_\phi = 12,5$ 1/м при зміні початкової шорсткості поверхонь тертя представлений на рис. 3.13 і рис. 3.14.

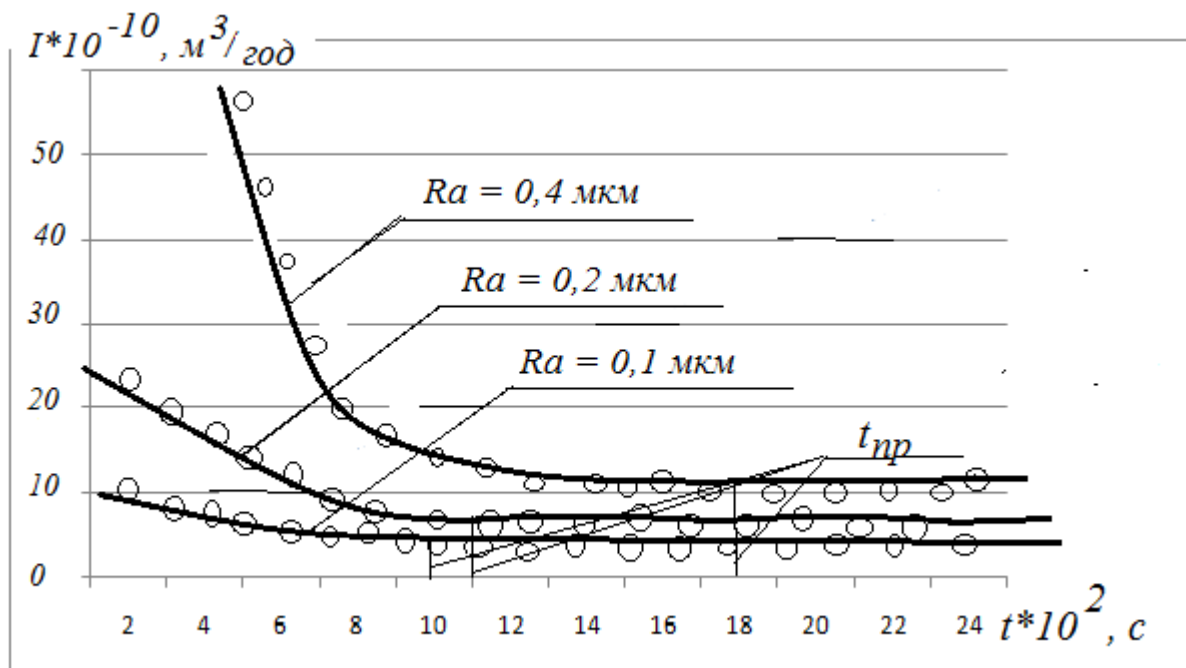


Рис. 3.13 – Залежності зміни швидкості зношування в процесі припрацювання від шорсткості поверхонь тертя для трибосистеми сталь

$$40X + \text{Бр.АЖ 9 - 4}, E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$$

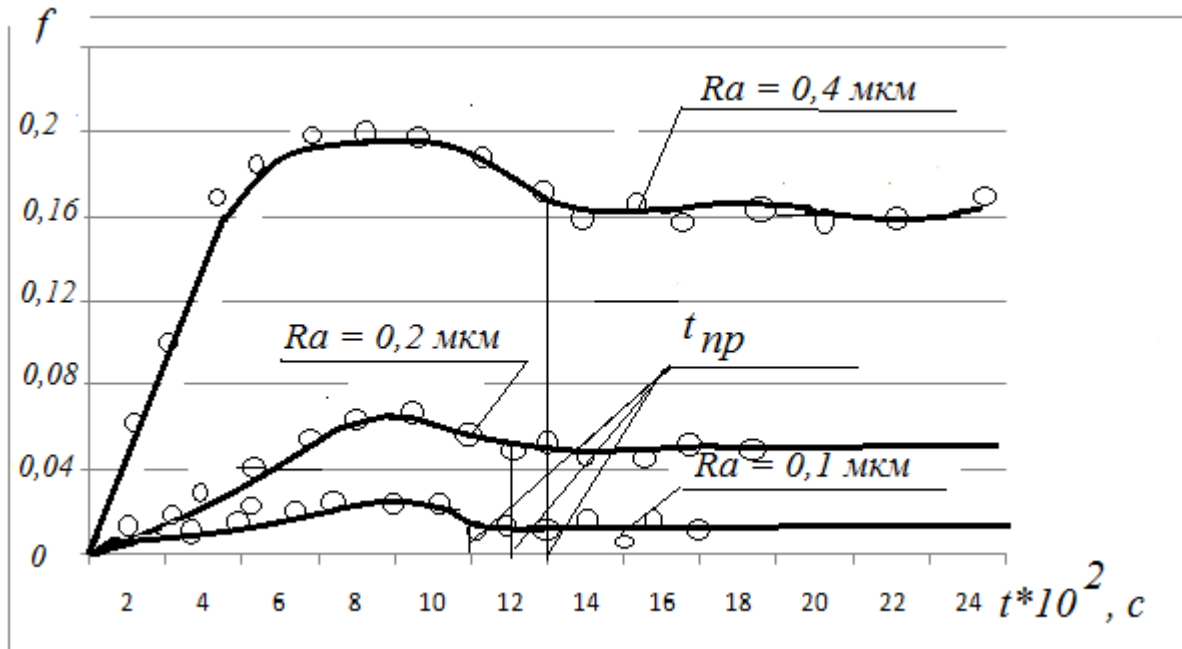


Рис. 3.14 – Залежності зміни коефіцієнта тертя в процесі припрацювання від шорсткості поверхонь тертя для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9-4,

$$E_y = 3,6 * 10^{14} \text{ Дж/м}^3$$

Порівняння результатів моделювання і експерименту представлені в додатку А, таблиці А7, А8, А9.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що максимальна похибка моделювання швидкості зношування не перевищує значень $e_I = 11,9 \dots 16,6 \%$, а коефіцієнта тертя $e_f = 13,0 \dots 18,5 \%$. Як випливає з отриманих результатів, збільшення шорсткості поверхонь призводить до збільшення похибки моделювання. Мінімальна похибка характерна для трибосистем з шорсткістю $Ra = 0,1$ мкм.

Аналогічний висновок справедливий і для параметра часу припрацювання. Зі збільшенням Ra період припрацювання збільшується, особливо для швидкості зношування. Для швидкості зношування $t_{np} = 900 \dots 1700$ с, для коефіцієнту тертя $t_{np} = 1000 \dots 1200$ с. Великі значення t_{np} відповідають великим значенням шорсткості.

Характер зміни процесу припрацювання трибосистем для різних значень навантаження $N = 600, 1000, 1400$ Н, представлений на рис. 3.15 и рис. 3.16.

Трибосистема сталь 40Х + Бр.АЖ9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³, $Ra = 0,2$ мкм,
 $v_{скл} = 0,5$ м/с, $K_f = 12,5$ 1/м.

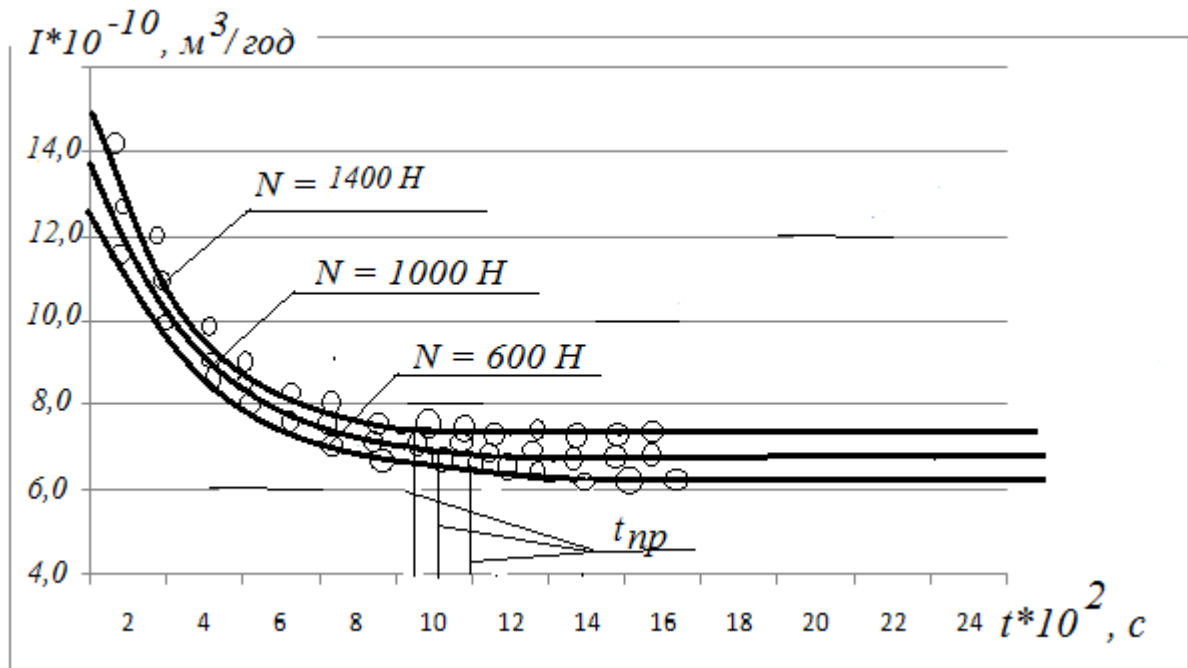


Рис. 3.15 – Залежності зміни швидкості зношування під час припрацювання для різних навантажень N : трибосистема сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4; $E_y = 7,2 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

Порівняння результатів моделювання і експерименту представлені в додатку А, таблиці А10, А11, А12.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що максимальна похибка моделювання швидкості зношування не перевищує значень $e_l = 13,3 \dots 14,2$ %, а коефіцієнта тертя $e_f = 14,2 \dots 15,0$ %.

Час припрацювання за параметром швидкості зношування зменшується при збільшенні N і становить $t_{np} = 1000 \dots 850$ с, а для коефіцієнта тертя, навпаки, зі збільшенням N – збільшується, $t_{np} = 1100 \dots 1350$ с.

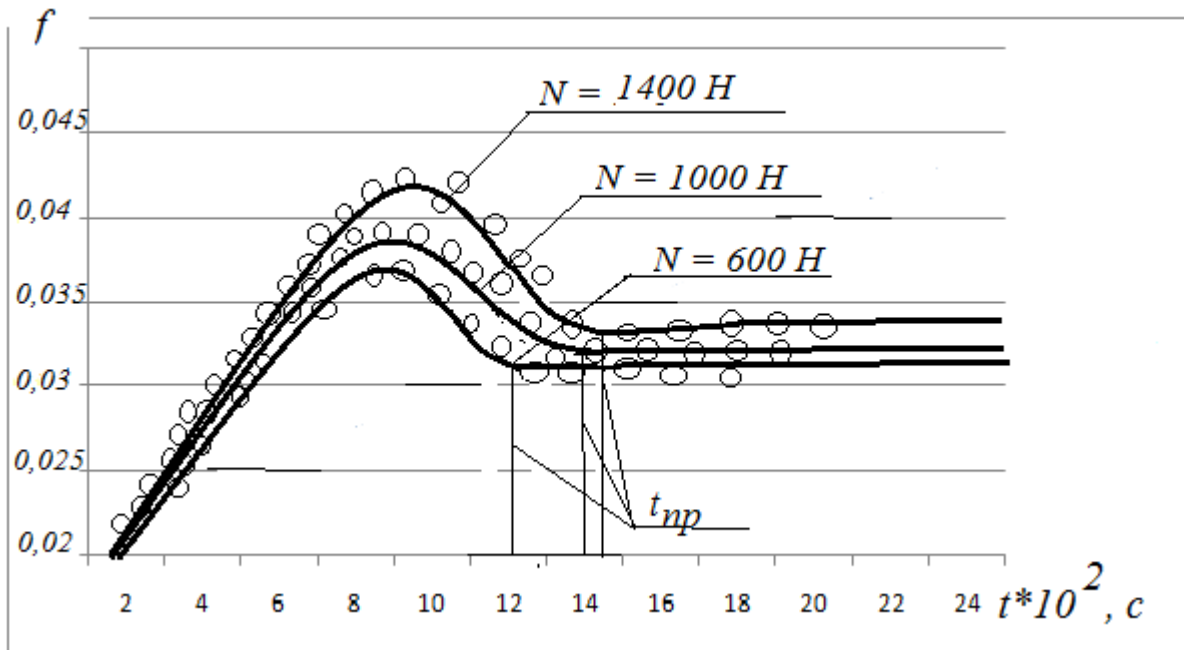


Рис. 3.16 – Залежності зміни коефіцієнта тертя під час припрацювання для різних навантажень N : трибосистема сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4;

$$E_y = 7,2 * 10^{14} \text{ Дж/м}^3$$

Отриманий масив експериментальних даних, а також даних, отриманих за допомогою моделювання, дозволив одержати залежності часу припрацювання t_{np} від основних факторів, які впливають на процес:

- трибологічних властивостей мастильного середовища, які враховуються параметром $E_y, \text{ Дж/м}^3$, рис. 3.17;
- реологічних властивостей структури сполучених матеріалів в трибосистемі, які враховуються параметром $\sqrt{\delta_p \cdot \delta_n / \pi}$, рис. 3.17;
- коефіцієнта форми трибосистеми, який враховує величини площ тертя і об'єми матеріалу, які розташовані під площами тертя у рухомих і нерухомих трибоелементів $K_\phi, 1/m$ рис. 3.18;
- шорсткостей поверхонь тертя Ra , мкм, рис. 3.18;
- навантаження на трибосистему N , Н, рис. 3.19.

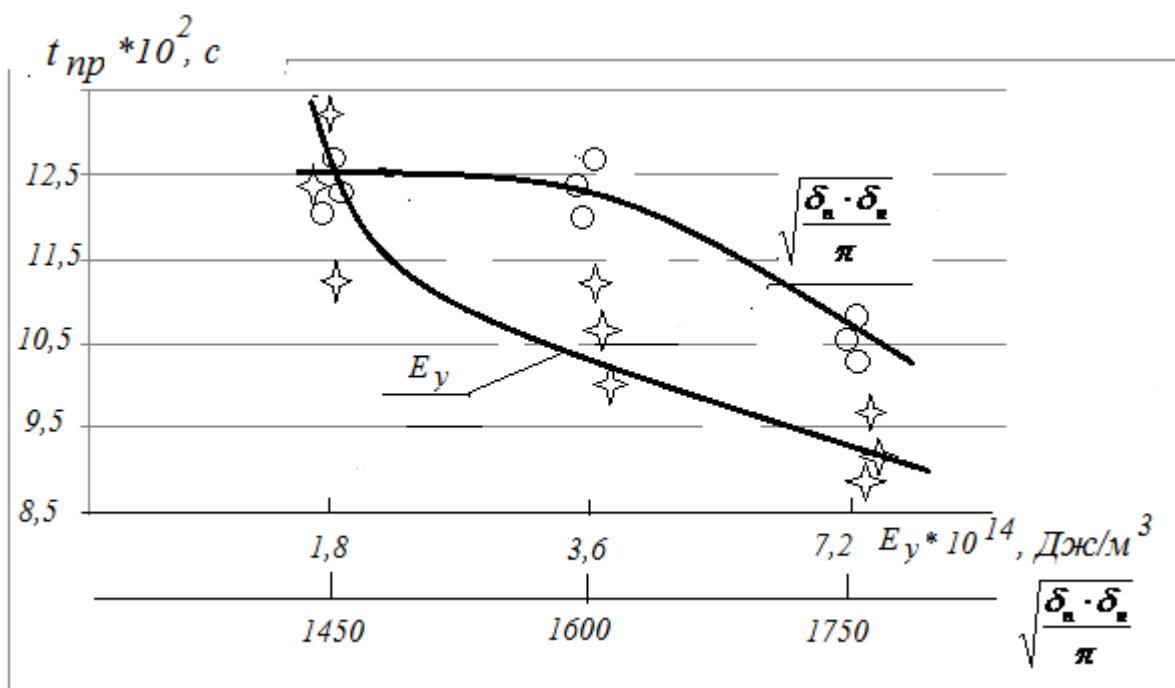


Рис. 3.17 – Залежності зміни часу припрацювання трибосистем при зміні трибологічних властивостей мастильного середовища і реологічних властивостей сполучених матеріалів

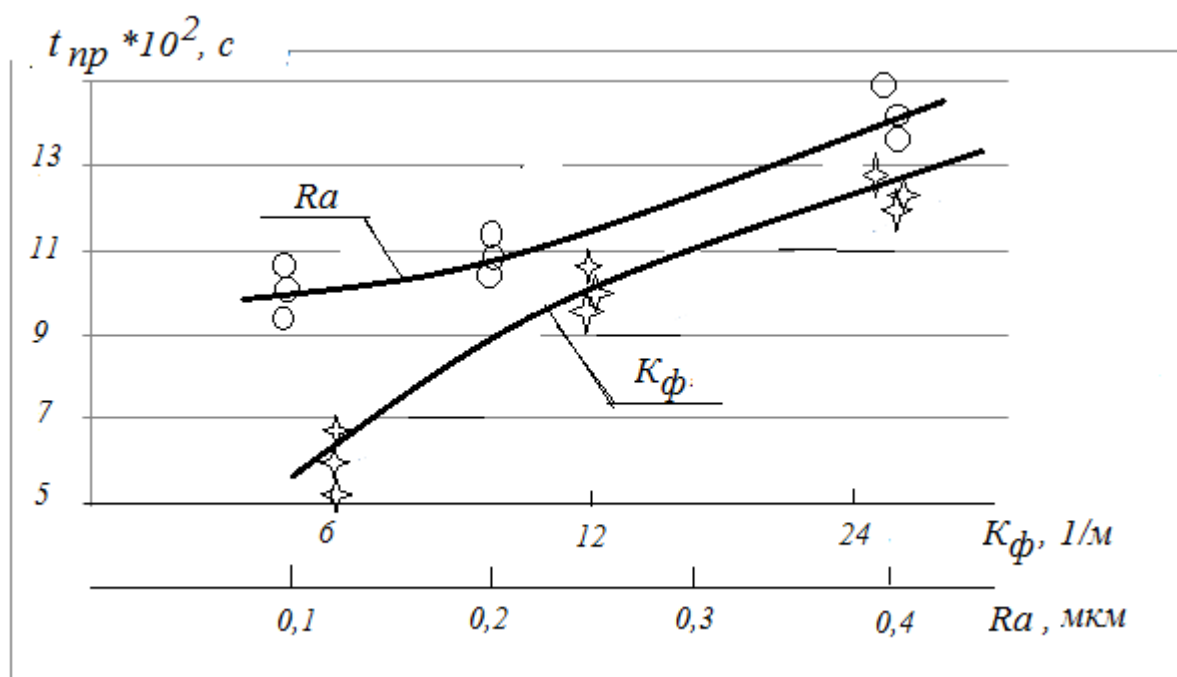


Рис. 3.18 – Залежності зміни часу припрацювання трибосистем при зміні коефіцієнта форми і шорсткості поверхонь сполучених матеріалів

Як випливає з представлених залежностей, вплив E_y та $\sqrt{\delta_p \cdot \delta_n / \pi}$ на процес припрацювання нелінійний. При великих значеннях зазначених параметрів період припрацювання трибосистем зменшується.

Вплив коефіцієнта форми K_ϕ трибосистеми і початкової шорсткості поверхонь тертя є також нелінійний. Однак ступінь впливу шорсткості на процес припрацювання більше, ніж E_y і K_ϕ . Зі збільшенням Ra час перехідного процесу значно зростає.

Ступінь впливу навантаження N , Н на період припрацювання трибосистем представлено на рис. 3.19. Як випливає з залежностей, збільшення навантаження збільшує період припрацювання за параметром коефіцієнта тертя $f(t)$, при одночасному зменшенні t_{np} по параметру швидкості зношування $I(t)$. Отже, для кожної конкретної трибосистеми буде оптимальне значення навантаження (перетин кривих на графіку), коли час припрацювання буде мінімальним.

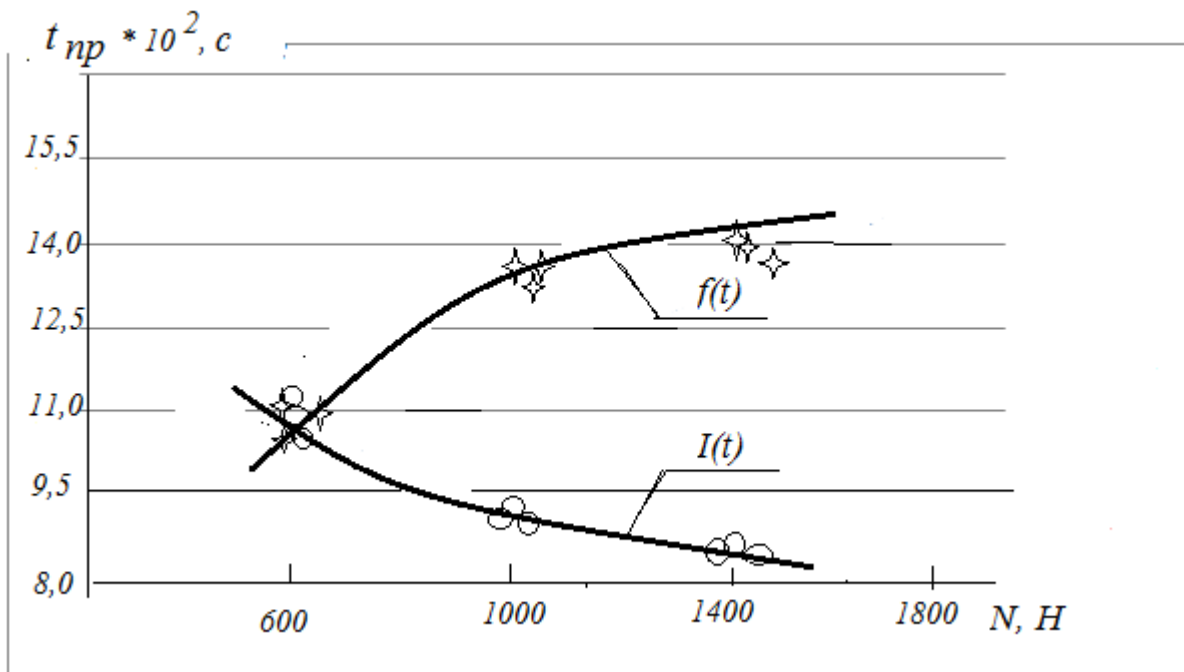


Рис. 3.19 – Залежності зміни часу припрацювання за параметром швидкості зношування і коефіцієнта тертя при зміні навантаження

На представлених залежностях рис. 3.17 - 3.19 поруч з кривими, отриманими моделюванням, нанесені експериментальні точки, які дозволили

розрахувати похибку моделювання. Похибка моделювання знаходиться в межах $e_t = 13,8 \dots 16,2 \%$.

Максимальна похибка моделювання характерна при зміні шорсткості, $Ra > 0,3$ мкм.

Проведені експериментальні дослідження та їх порівняння з результатами моделювання дозволили внести корекцію в розроблені моделі. Дана корекція виконана шляхом зміни величини коефіцієнтів підсилення K_1 і K_2 , а також постійних часу T_1 і T_2 .

Коефіцієнт підсилення K_1 , формула (3.37) набуває вигляду:

$$K_1 = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{\text{фнк}}}{Q} = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{\text{фнк}} \cdot \dot{\epsilon}_{np}}{K_{\phi}^2 \cdot a_{np} \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}} . \quad (3.54)$$

Коефіцієнт підсилення K_2 , формула (3.38) набуває вигляду:

$$K_2 = \frac{Q \cdot a_{np} \cdot d_{\text{фнк}}}{130 \cdot W_{mp}} = \frac{K_{\phi}^2 \cdot a_{np}^2 \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} \cdot d_{\text{фнк}}}{130 \cdot \dot{\epsilon}_{np} \cdot (W_n + W_n)} . \quad (3.55)$$

Постійна часу T_1 , формула (3.45), набуває вигляду:

$$T_1 = \frac{9 \cdot \pi \left(\sqrt[3]{V_{np}} \right)^2}{a_{np}} = \frac{9 \cdot \pi V_{np}^{0,666}}{a_{np}} , c . \quad (3.56)$$

Постійна часу T_2 , формула (3.47), набуває вигляду:

– для швидкості зношування:

$$T_{2,I} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot K_{\phi} \cdot h_{\partial,np}}{\dot{\epsilon}_{np}} , c , \quad (3.57)$$

– для коефіцієнту тертя:

$$T_{2,f} = \frac{7,5 \cdot 10^8 \cdot K_{\phi} \cdot h_{\partial,np}}{\dot{\epsilon}_{np}} , c . \quad (3.58)$$

При підстановці отриманих коефіцієнтів і постійних часу в математичні моделі буде отримана мінімальна похибка моделювання, для швидкості зношування $e_l = 11,9 \dots 16,6 \%$, для коефіцієнту тертя $e_f = 13,0 \dots 18,5 \%$.

Наведені вище результати отримані з урахуванням корекції коефіцієнтів підсилення K_1 і K_2 і постійних часу T_1 і $T_{2,l}$ та $T_{2,f}$.

Для оцінки відносної величини зміни часу припрацювання трибосистем при варіюванні наведених вище факторів скористаємося величиною коефіцієнта варіації:

$$\mathcal{V}_t = \frac{\sigma_t}{t_{np,cp}} \cdot 100, \% , \quad (3.59)$$

де σ_t – середньоквадратичне відхилення часу припрацювання, обчислюється за формулою:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{np,i} - t_{np,cp})^2} , \quad (3.60)$$

де n – обсяг спостереження;

$t_{np,cp}$ – середньоарифметична величина часу припрацювання, обчислюється за формулою:

$$t_{np,cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{np,i} . \quad (3.61)$$

Результати розрахунку коефіцієнта варіації представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку коефіцієнта варіації часу припрацювання при зміні основних факторів

Фактор	$t_{np,max}$ с	$t_{np,min}$ с	$t_{np,cp}$ с	σ_t , с	\mathcal{V}_t , %
Мастильне середовище E_v , Дж/м ³	1400	900	1150	288,67	25,1
Сполучені матеріали $\sqrt{\delta_p \cdot \delta_n} / \pi$	1400	1000	1200	230,9	19,2

Продовження таблиці 3.4

Коефіцієнт форми K_ϕ , 1/м	1500	500	1000	577,3	57,7
Шорсткість поверхонь Ra , мкм	1700	900	1300	461,8	35,5
Навантаження N , Н	1350	850	1100	433,0	39,36

Аналіз значень коефіцієнта варіації дозволяє побудувати рейтинг впливу факторів на процес припрацювання трибосистем.

1. Коефіцієнт форми трибосистеми має найбільший вплив з наведених факторів.

2. Навантаження, при якому виконується припрацювання трибосистеми. Даний фактор стоїть на другому місці за значимістю.

3. Шорсткість поверхонь тертя, з якої починається припрацювання, на третьому місці за значимістю.

4. Трибологічні властивості мастильного середовища, на четвертому місці.

5. Сполучення матеріалів, їх реологічні властивості, на п'ятому місці.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити наявність або відсутність коливань швидкості зношування і коефіцієнта тертя під час припрацювання. Це дозволило внести корекцію в величини декрементів загасання, формула (3.11) і (3.22).

Декремент загасання коливань швидкості зношування після завершення припрацювання визначається за формулою:

$$d_1 = \frac{T_1 + T_2 + K_1 \cdot K_2}{3,2 \cdot T_1} \cdot \quad (3.62)$$

Декремент загасання коливань коефіцієнту тертя після завершення припрацювання визначається за формулою:

$$d_f = \frac{T_1 + T_{2f}}{3 \cdot T_f \cdot K_1 \cdot K_2} \cdot \quad (3.63)$$

Для моделювання процесу припрацювання трибосистем була написана програма в середовищі EXCEL.

3.4 Висновки по третьому розділу

1. Виконано структурну 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 слід, 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.

2. Виконано параметричну ідентифікацію динамічних моделей процесу припрацювання трибосистем. Отримано вирази для визначення коефіцієнтів підсилення і постійних часу. Показано, що після їх підстановки в рішення диференційних рівнянь можна моделювати процеси зміни швидкості зношування і коефіцієнта тертя під час припрацювання.

3. 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. Коефіцієнт K_2 визначає 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.

4. 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 %. Максимальна похибка моделювання отримана при зміні шорсткості поверхні.

5. 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 трибосистем.

6. 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.

РОЗДІЛ 4

КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ ПРОЦЕСУ ПРИПРАЦЮВАННЯ ТРИБОСИСТЕМ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО МАЩЕННЯ

4.1 Критерій оцінки добротності трибосистем

Огляд робіт, який наведено в 1 розділі дисертації, дозволяє сформулювати визначення добротності трибосистеми – це розмірна величина, яка оцінює здатність сполучених матеріалів і мастильного середовища перетворювати роботу сил тертя в теплову енергію, тим самим перешкоджати запасам енергії в поверхневих шарах трибоелементів. Дане визначення сформульовано в роботі [178], де наведено формулу для розрахунку добротності і представлено шляхи її підвищення.

З урахуванням сформульованого визначення в 3 розділі даної роботи запропоновано вираз, який доповнює фізичний зміст добротності [178]:

$$Q = \frac{K_{\phi}^2 \cdot a_{np} \cdot E_y}{\dot{\epsilon}_{np}} \cdot \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж} / \text{ м}^3. \quad (4.1)$$

Отриманий вираз добротності (4.1), на відміну від відомого [178], враховує геометричні розміри і кінематичну схему трибосистеми, температуропровідність матеріалів і швидкість поширення деформації в поверхневих шарах матеріалів трибоелементів в процесі їх контактної взаємодії.

Проведемо дослідження характеру зміни добротності трибосистем при зміні параметрів, які входять у вираз (4.1).

Залежності зміни величини добротності від зміни коефіцієнта форми трибосистеми K_{ϕ} , реологічних властивостей структури сполучених матеріалів $\delta_p \cdot \delta_n$ їх температуропровідності a_{np} і трибологічних властивостей мастильного середовища E_y , представлені на рис. 4.1. Це параметри, збільшення яких прямо пропорційно впливає на величину добротності, за винятком коефіцієнта форми.

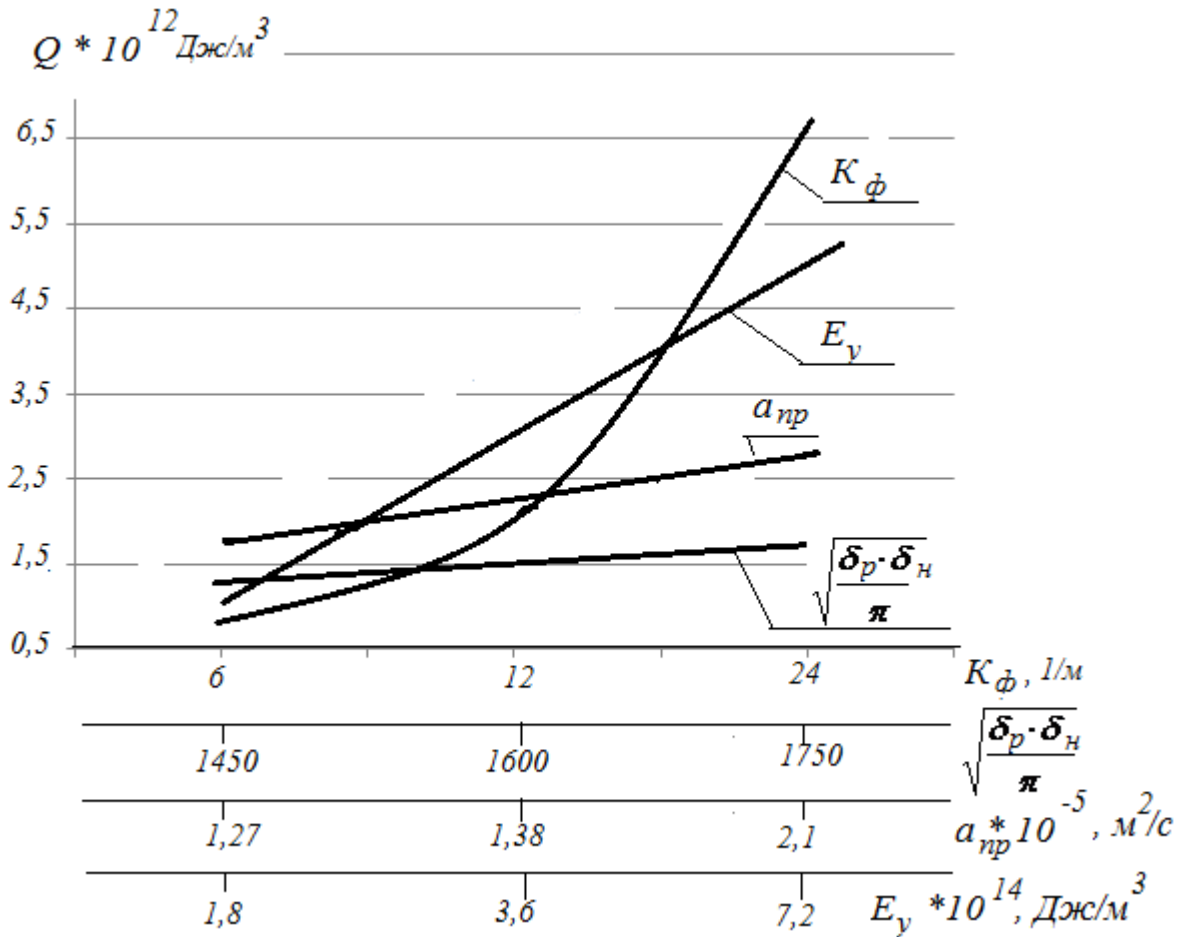


Рис. 4.1 – Залежності зміни величини добротності трибосистем від зміни коефіцієнта форми, реологічних властивостей матеріалів трибоелементів їх температуропровідності і трибологічних властивостей мастильного середовища

Як випливає з аналізу кривих, найбільший вплив на добротність надає конструкція трибосистеми, формула (3.31), яка враховує величини площ тертя у нерухомого та рухомого трибоелементів, їхнє співвідношення і величини об’ємів матеріалу, які розташовані під площами тертя. Далі, за рівнем зменшення, трибологічні властивості мастильного середовища, температуропровідність матеріалів трибоелементів і реологічні властивості структури матеріалів.

Величина швидкості деформації в поверхневих шарах матеріалів трибоелементів $\dot{\epsilon}_{np}$, формула (3.33), обернено пропорційна величині добротності. Параметри, які входять у вирази швидкості деформації матеріалів

нерухомого та рухомого трибоелементів, визначаються виразами (3.34) і (3.35), вплив яких представлено на рис. 4.2.

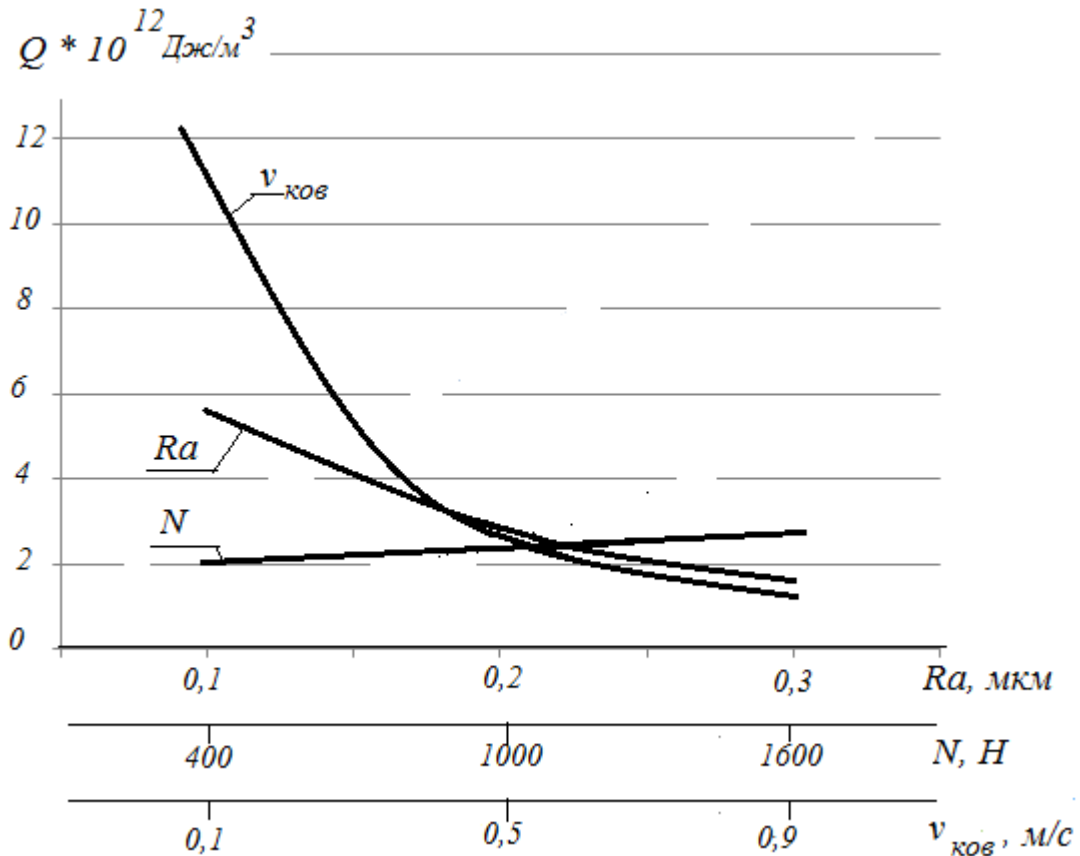


Рис. 4.2 – Залежності зміни величини добротності трибосистем від зміни шорсткості поверхонь тертя, навантаження і швидкості ковзання

Як випливає з аналізу отриманих залежностей, найбільший вплив на добротність трибосистеми надає величина швидкості ковзання, а потім, по мірі зменшення – шорсткість поверхонь тертя і навантаження.

Проведені теоретичні дослідження дозволяють виконати рейтинг впливу зазначених вище параметрів на добротність трибосистем. При цьому, діапазон зміни параметрів обраний в межах функціонування трибосистем в режимах нормального зношування, тобто без пошкоджуваності. Відношення максимального значення добротності до мінімального, при зміні одного з параметрів, дозволяє визначити у скільки разів змінюється показник добротності в заданих межах моделювання.

Максимальний вплив на добротність надають два параметри: коефіцієнт форми і швидкість ковзання. При цьому коефіцієнт форми стоїть на першому місці – 9,28 раз, а швидкість ковзання на другому – 9,23 раз.

На третьому місці – трибологічні властивості мастильного середовища – 5,55 раз, на четвертому – шорсткість поверхонь, 4,83 раз, на п'ятому – температуропровідність матеріалів трибоелементів – 1,55 раз. На шостому місці за значимістю, навантаження – 1,5 рази, і на останньому, сьомому місці, реологічні властивості структури сполучених матеріалів – 1,28 рази.

На підставі виконаного рейтингу можна обґрунтувати параметри, які впливають на добротність, а отже, і на час перехідного процесу в трибосистемі. Це швидкість ковзання, шорсткість поверхонь тертя і мастильне середовище. Коефіцієнт форми трибосистеми в процесі припрацювання не змінюється. Це величина, яка визначається при проектуванні і є константою в процесі припрацювання і експлуатації трибосистеми.

Величина шорсткості також формується в процесі виробництва трибосистем, проте в процесі припрацювання і експлуатації змінюється і встановлюється біля рівноважної величини.

Трибологічні властивості мастильного середовища також не змінюються в процесі припрацювання, проте змінюються в процесі експлуатації.

Виходячи з викладеного, можна зробити висновок, що процесом припрацювання можна управляти, змінюючи ε_{np} , формула (4.1), в сторону зменшення. Для цього необхідно зменшити швидкість ковзання $v_{ков}$ і навантаження N . Аналіз залежностей, представлених на рис. 4.2, дозволяє стверджувати, що зміна навантаження N незначно впливає на величину добротності, а швидкість ковзання $v_{ков}$ є ефективним параметром, змінюючи який можна управляти процесом припрацювання.

Моделювання зміни швидкості зношування і коефіцієнта тертя для різних трибосистем дозволило отримати теоретичні залежності зміни зазначених параметрів від величини добротності.

На рис. 4.3 представлені теоретичні криві зміни максимального значення швидкості зношування під час припрацювання I_{max} та сталого значення швидкості зношування після завершення припрацювання I_{cm} для трибосистем з різною добротністю. Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що збільшення добротності трибосистеми знижує величини швидкості зношування, як в процесі припрацювання, так і після завершення припрацювання на сталому режимі.

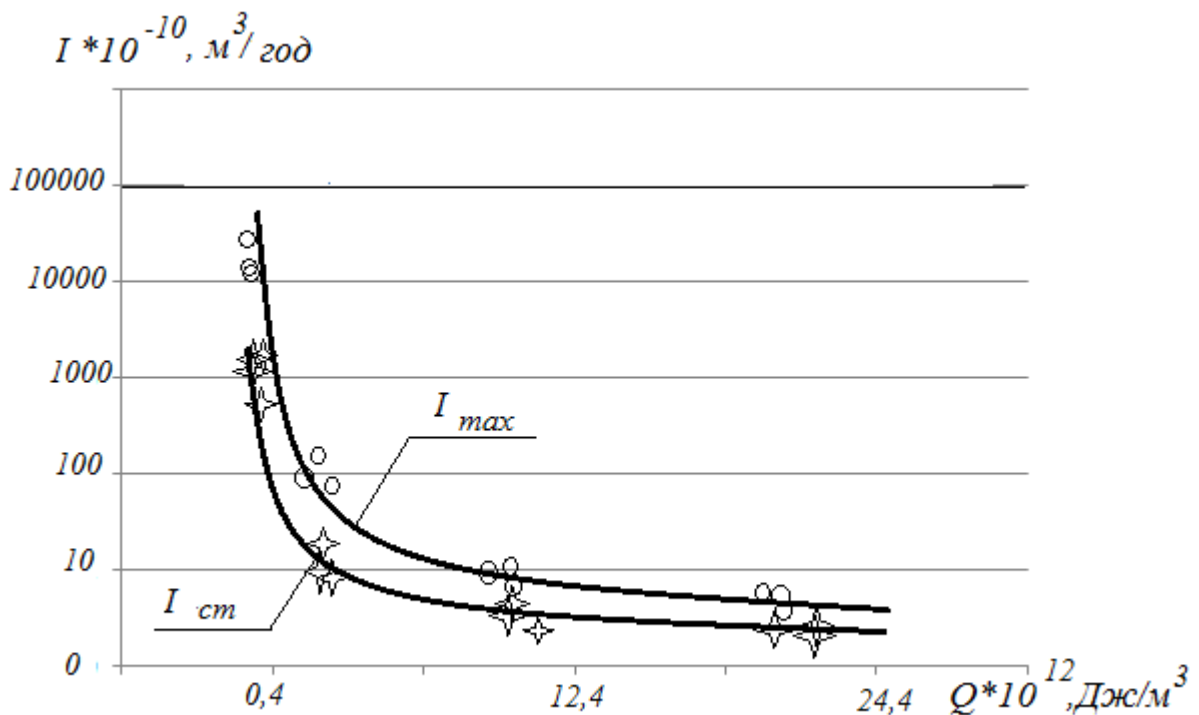


Рис. 4.3 – Залежність зміни максимального значення швидкості зношування в процесі припрацювання і на сталому режимі після завершення припрацювання від величини добротності трибосистем

Аналогічні дослідження були виконані для коефіцієнта тертя, рис. 4.4, що також дозволяє зробити висновок про наявність функціонального зв'язку між максимальними та сталими значеннями коефіцієнта тертя в процесі припрацювання і величиною добротності трибосистем. Отримані теоретичні криві були перевірені експериментально. На рис. 4.3 і 4.4 нанесені експериментальні точки для трибосистем з різними значеннями добротності.

Наприклад, для вищих кінематичних пар, де контакт здійснюється по лінії з коефіцієнтом взаємного перекриття менше 0,1 та сполучених матеріалів: сталь 40X + сталь 40X, добротність трибосистеми $Q \leq 0,4 \cdot 10^{12}$ Дж/м³. Для нижчих кінематичних пар, де контакт здійснюється за площею з коефіцієнтом взаємного перекриття більше 0,5 та сполучених матеріалів: сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, добротність трибосистеми $Q = (12 \dots 24) \cdot 10^{12}$ Дж/м³.

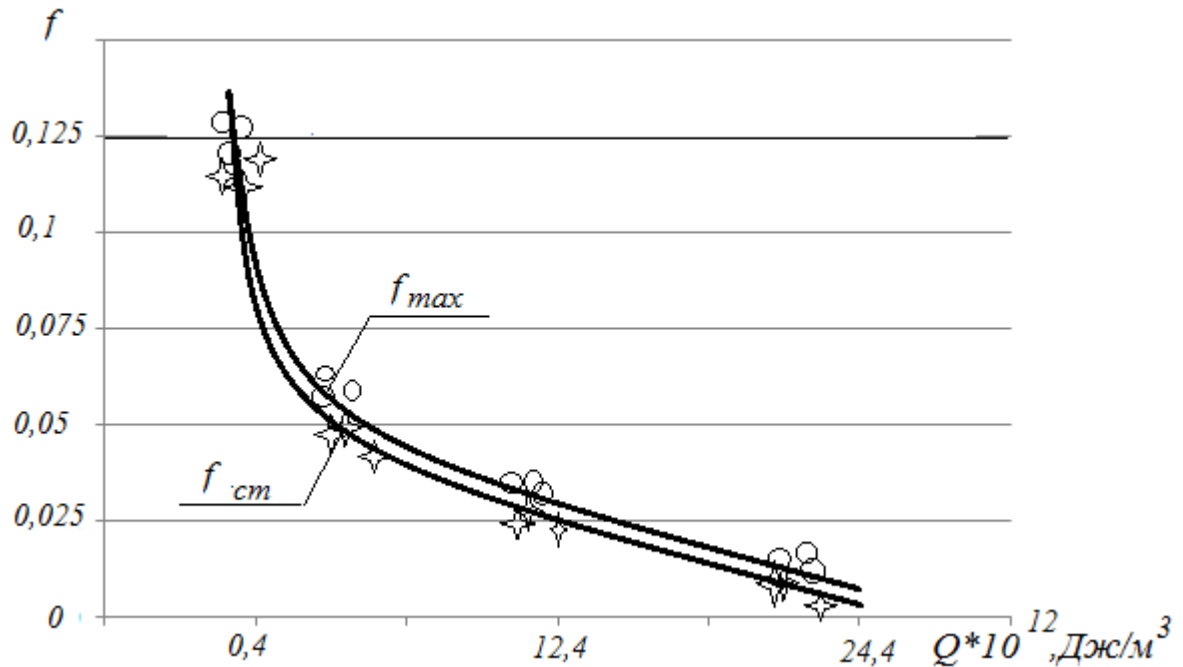


Рис. 4.4 – Залежність зміни максимального значення коефіцієнта тертя в процесі припрацювання та на сталому режимі після завершення припрацювання від величини добротності трибосистем

Розрахунок відносної похибки моделювання між теоретичними і експериментальними значеннями швидкості зношування виконували за формулою (3.51), а для коефіцієнта тертя за формулою (3.52). Відносна похибка склала: $e_f = 7,2 \dots 8,3 \%$, $e_f = 7,9 \dots 9,3 \%$, що є задовільним результатом при моделюванні процесів тертя та зношування.

Результати моделювання та їх експериментальна перевірка функціонального зв'язку між часом припрацювання t_{np} і добротністю трибосистеми Q представлена на рис.4.5.

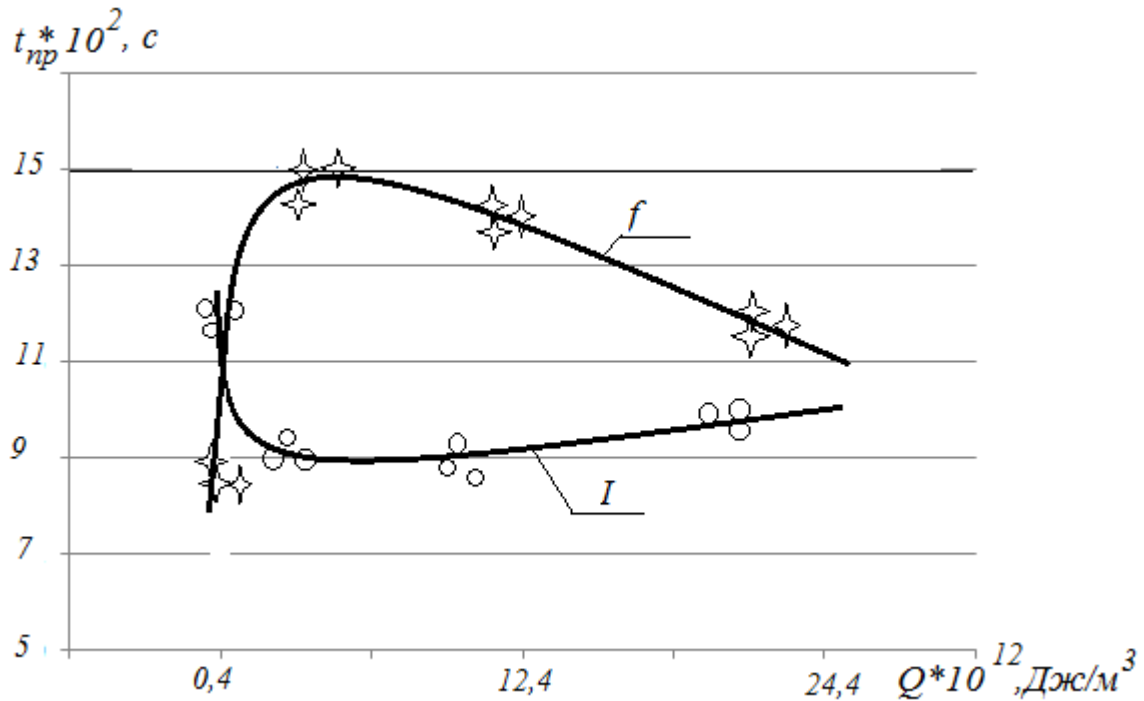


Рис. 4.5 – Залежності зміни часу припрацювання за параметрами швидкості зношування та коефіцієнта тертя від величини добротності трибосистем

Трибосистеми із значеннями $Q \leq 0,4 \cdot 10^{12}$ Дж/м³, а це в основному вищі кінематичні пари, мають мінімальний час припрацювання за коефіцієнтом тертя і одночасно, максимальний час за швидкістю зношування. При переході до нижчих кінематичних пар $Q > 0,4 \cdot 10^{12}$ Дж/м³, де контакт здійснюється за площею, менший час припрацювання відповідає параметру швидкості зношування, а більший – коефіцієнту тертя. При збільшенні добротності трибосистем час припрацювання по параметру коефіцієнта тертя значно зменшується, однак при цьому незначно збільшується час припрацювання по параметру швидкості зношування.

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

Розрахунок відносної похибки моделювання часу припрацювання за формулою (3.53) дозволяє стверджувати, що $e_t = 8,2 \dots 9,4$ %.

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.

4.2 Критерії оцінки чутливості і припрацювання трибосистем

Під чутливістю будемо розуміти здатність трибосистеми реагувати на зміну зовнішніх впливів, змінюючи швидкість зношування і коефіцієнт тертя, наприклад, при зміні навантаження, швидкість ковзання або трибологічні властивості мастильного середовища, а також кількісну величину цієї здатності.

Згідно з отриманих диференційних рівнянь (3.13) і (3.24) коефіцієнт підсилення K_1 характеризує реакцію трибосистеми на вхідний сигнал, формула (3.54):

$$K_1 = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{фнк}}{Q} = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{фнк} \cdot \dot{\varepsilon}_{np}}{K_{\phi}^2 \cdot a_{np} \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}}} \quad (4.2)$$

Як впливає з виразу (4.2), на величину коефіцієнта K_1 , який визначає чутливість трибосистеми, впливає ряд параметрів, в тому числі вище отриманий критерій добротності.

Результати моделювання зміни коефіцієнта K_1 від основних параметрів, які впливають на процес припрацювання, представлені на рис. 4.6. Аналіз отриманих кривих дозволяє стверджувати, що на чутливість трибосистеми до зміни зовнішніх впливів, в першу чергу, впливає шорсткість поверхонь тертя, потім, в порядку зменшення впливу – швидкість ковзання, а потім мастильне середовище.

Навантаження на трибосистему впливає в незначній мірі. При цьому збільшення шорсткості поверхонь тертя Ra і швидкості ковзання $v_{ков}$ підвищує

чутливість трибосистеми до зовнішніх впливів, що буде сприяти збільшенню швидкості зношування та коефіцієнту тертя під час припрацювання, тим самим сприяти збільшенню часу припрацювання. Збільшення трибологічних властивостей мастильного середовища E_y сприяє зниженню чутливості, а отже і зниженню швидкості зношування та коефіцієнту тертя під час припрацювання.

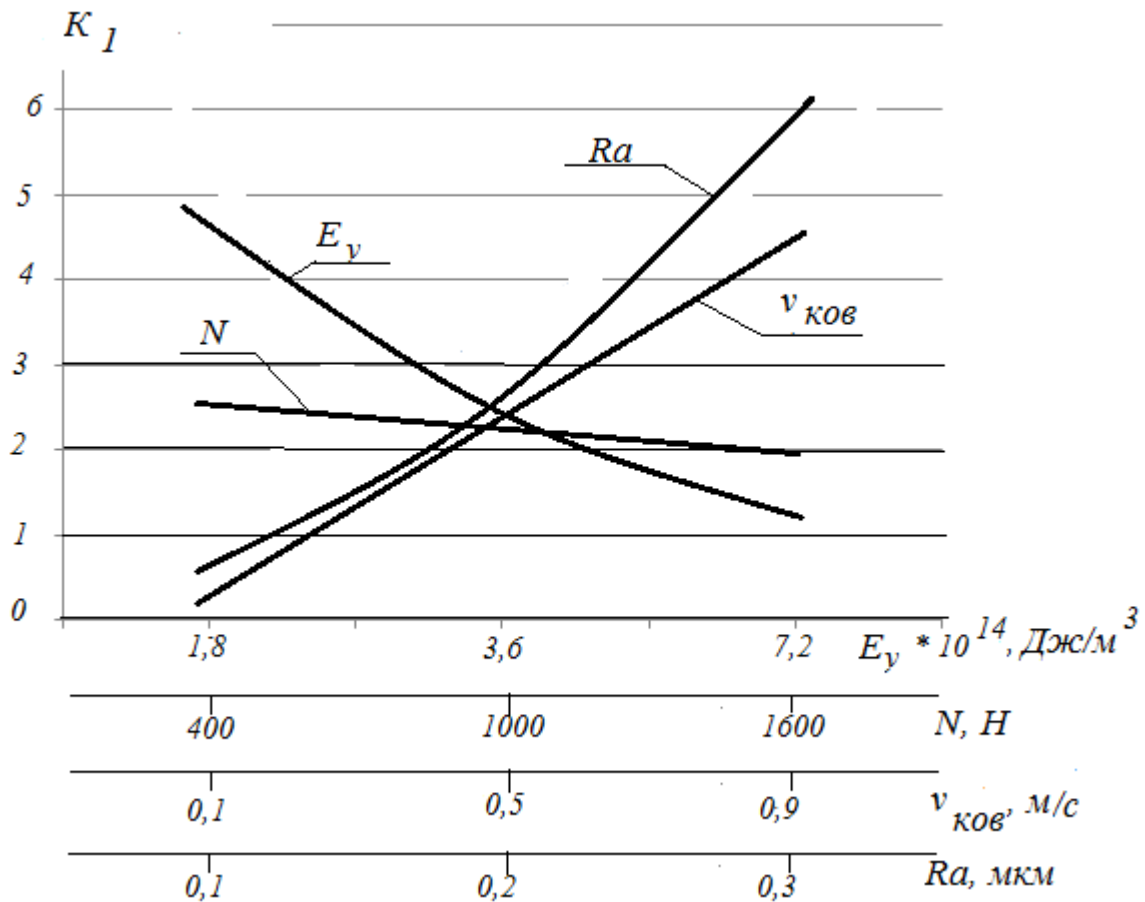


Рис. 4.6 – Залежності зміни коефіцієнта K_I від трибологічних властивостей мастильного середовища, навантаження, швидкості ковзання та шорсткості поверхонь тертя

Ступінь впливу чутливості трибосистеми на час припрацювання представлено залежностями на рис. 4.7. Як випливає з представлених результатів, для параметра швидкості зношування існує оптимальне значення $K_I = 3 \dots 4$. Подальше збільшення K_I буде викликати збільшення часу

припрацювання. При цьому, збільшення K_I знижує час припрацювання по параметру коефіцієнта тертя.

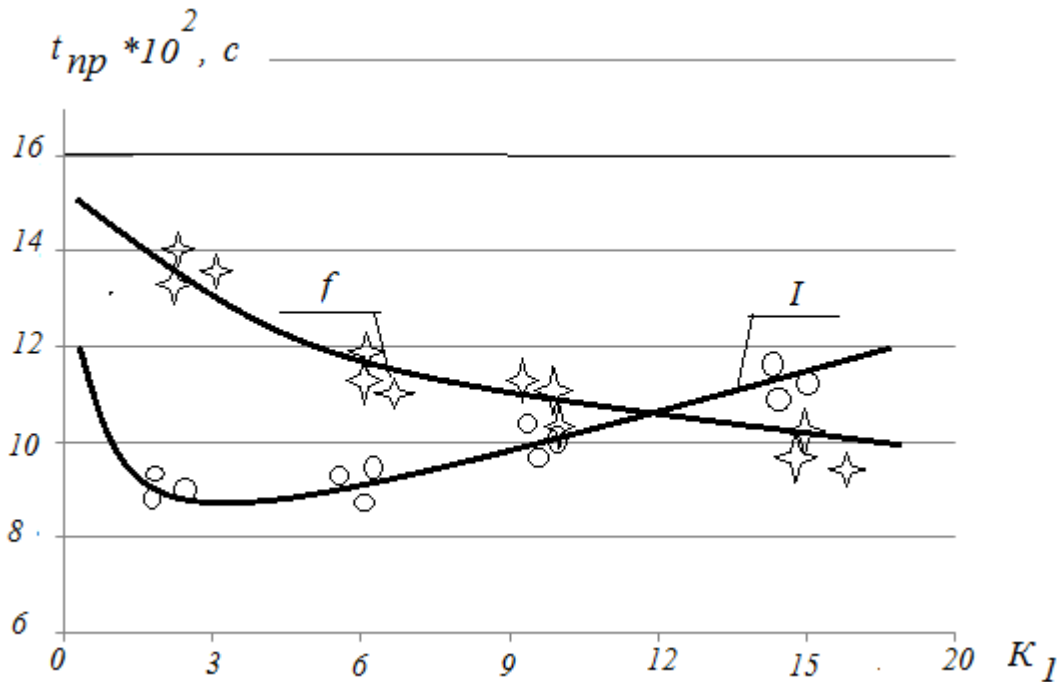


Рис. 4.7 – Залежності зміни часу припрацювання по параметру швидкості зношування та коефіцієнту тертя від величини критерію чутливості трибосистеми K_I

Поруч з теоретичними кривими на рис. 4.7 нанесені експериментальні точки і розрахована відносна похибка моделювання, яка становить $e_t = 7,9 \dots 9,0 \%$.

Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що коефіцієнт підсилення K_I може виступати безрозмірним критерієм чутливості трибосистеми до зміни зовнішніх впливів під час припрацювання. Чим менше значення K_I , тим більш стійка трибосистема до зовнішніх впливів.

На підставі залежностей, представлених на рис. 4.6, можна розробити заходи щодо зниження критерію чутливості K_I . Для цього необхідно збільшувати трибологічні властивості мастильного середовища, знижувати шорсткість поверхонь тертя і зменшувати швидкість ковзання під час

припрацювання. Параметр навантаження N , як впливає з рис. 4.6, не робить значного впливу на зміну критерію чутливості K_1 .

Згідно ДСТУ 2823-94, а також ГОСТ ІСО 4378-1-2001 під припрацюванням трибосистеми розуміється процес зміни шорсткості поверхонь тертя і структури матеріалів поверхневих шарів, які призводять до зниження швидкості зношування і коефіцієнта тертя та їх стабілізацію на певному рівні. Час стабілізації параметрів називають періодом припрацювання.

Згідно отриманих диференціальних рівнянь (3.13) і (3.24), коефіцієнт підсилення K_2 характеризує здатність трибосистеми змінювати шорсткість і структуру поверхневих шарів при зміні зовнішніх умов, формула (3.55):

$$K_2 = \frac{Q \cdot a_{np} \cdot d_{фнк}}{130 \cdot W_{mp}} = \frac{K_{\phi}^2 \cdot a_{np}^2 \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} \cdot d_{фнк}}{130 \cdot \dot{\epsilon}_{np} \cdot (W_p + W_n)}. \quad (4.3)$$

Результати моделювання зміни коефіцієнта K_2 від основних параметрів, які впливають на процес припрацювання, представлені на рис. 4.8.

Аналіз отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що на процес припрацювання трибосистем при зміні зовнішніх впливів, в першу чергу, впливає швидкість ковзання і початкова шорсткість поверхонь тертя і в меншій мірі – мастильне середовище. Навантаження не впливає на зміну коефіцієнта K_2 .

Функціональний зв'язок коефіцієнта K_2 і часу припрацювання трибосистем представлено на рис. 4.9. 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.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що коефіцієнт K_2 , формула (4.3), може виступати в якості безрозмірного критерію припрацювання трибосистем.

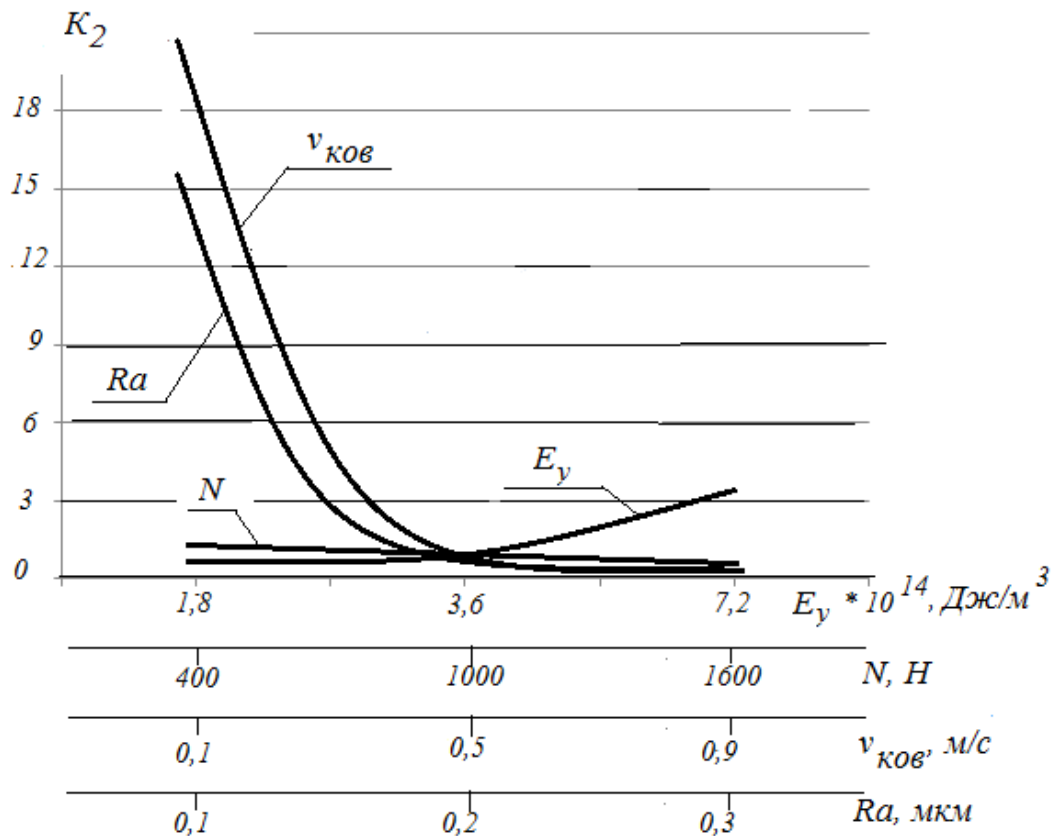


Рис. 4.8 – Залежності зміни коефіцієнта K_2 від трибологічних властивостей мастильного середовища, навантаження, швидкості ковзання та шорсткості поверхонь тертя

Для поліпшення здатності до припрацювання трибосистем (збільшення коефіцієнта K_2) необхідно зменшувати швидкість ковзання і початкову шорсткість поверхонь тертя при одночасному збільшенні трибологічних властивостей мастильного середовища. Змінюючи ці параметри, можна управляти процесом припрацювання, забезпечуючи $t_{np} \rightarrow \min$.

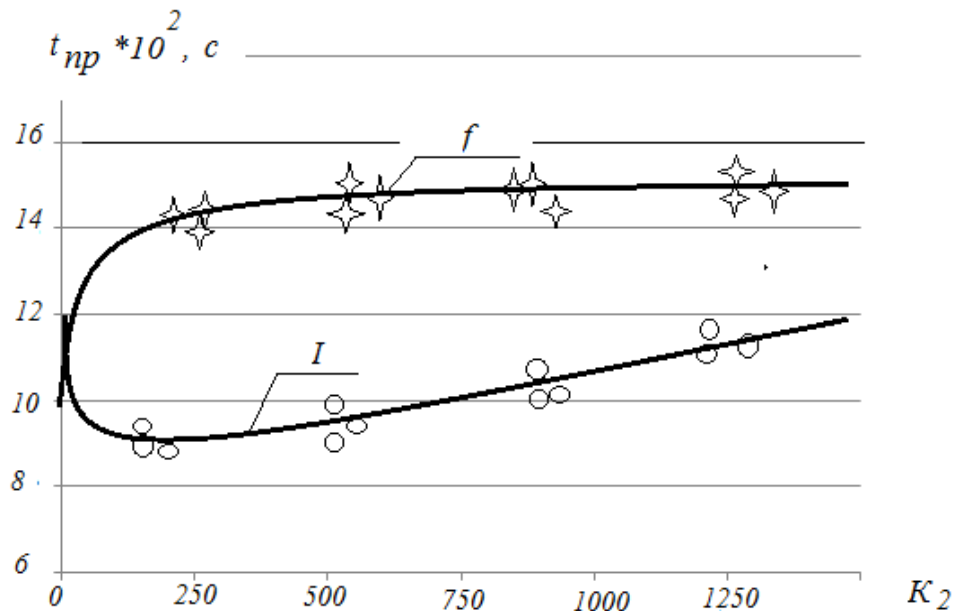


Рис. 4.9 – Залежності зміни часу припрацювання по параметру швидкості зношування та коефіцієнту тертя від величини критерію припрацювання трибосистем K_2 .

4.3 Критерії оцінки інерційності трибосистем при зміні зовнішніх впливів

Під інерційністю трибосистеми будемо розуміти здатність реагувати на зміну вхідного впливу у вигляді зміни навантаження, швидкості ковзання, мастильного середовища, здійснюючи перетворення механічної енергії деформації шорсткостей і матеріалу поверхневих шарів в теплову енергію, розсіюючи її в навколишнє середовище, тим самим послаблюючи вхідний вплив. Дана властивість дозволяє трибосистемі повертатися у початковий стійкий стан після завершення впливу зовнішніх збурень.

Згідно отриманих диференціальних рівнянь (3.13) і (3.24), постійна часу T_1 визначає час, який необхідно для зміни градієнта температур по всьому об'єму трибоелементів. Даний час визначається за виразом (3.56):

$$T_1 = \frac{9 \cdot \pi \left(\sqrt[3]{V_{np}} \right)^2}{a_{np}} = \frac{9 \cdot \pi V_{np}^{0,666}}{a_{np}}, c. \quad (4.4)$$

Малі значення T_l пов'язані з швидким вирівнюванням температур по всьому об'єму трибоелементів при зміні навантаження або швидкості ковзання під час припрацювання або експлуатації. Аналіз виразу (4.4) показує, що для цього необхідно зменшувати об'єми, розташовані під площами тертя при одночасному збільшенні температуропровідності матеріалів, з яких виготовлені трибоелементи.

Результати моделювання ступеня впливу приведенного об'єму V_{np} трибосистеми, формула (3.46), та приведеного коефіцієнта температуропровідності a_{np} трибосистеми, формула (3.32), на постійну часу T_l , представлені на рис. 4.10.

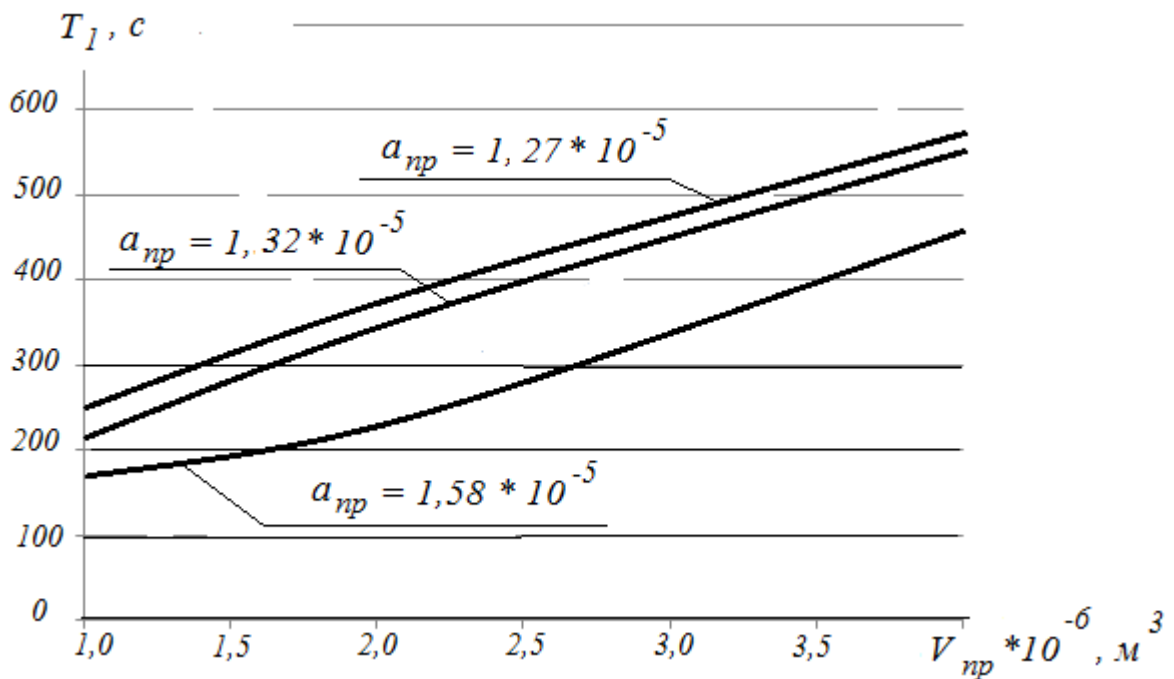


Рис. 4.10 – Залежності зміни постійної часу T_l від приведеного об'єму та коефіцієнта температуропровідності матеріалів трибоелементів

Аналізуючи представлені залежності, можна зробити висновок, що зниження постійної часу T_l можна виконати шляхом зменшення об'єму матеріалу трибоелементів під площами тертя та застосуванням матеріалів з високою температуропровідністю.

Функціональна залежність між часом припрацювання та постійної часу T_1 представлена на рис. 4.11. З аналізу залежностей випливає, що малі значення T_1 сприяють зниженню швидкості зношування під час припрацювання та часу припрацювання. Однак за параметром коефіцієнта тертя час припрацювання залишається великим. Отже необхідно вибрати компромісне значення величини постійної часу, що не перевищує значень $T_1 \leq 500$ с.

Результати моделювання, рис. 4.11, були перевірені експериментально, де поруч з теоретичними кривими нанесені точки для трибосистем з різними значеннями T_1 . Відносна похибка моделювання $e_t = 8,4 \dots 9,1$ %.

На підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів можна зробити висновок, що постійна часу T_1 може виступати критерієм інерційності трибосистеми, який характеризує час вирівнювання температурних полів по всьому об'єму трибоелементів при зміні навантаження або швидкості ковзання. Чим менше критерій інерційності T_1 , тим швидше відбувається вирівнювання температур, а отже і менше період припрацювання по параметру швидкості зношування.

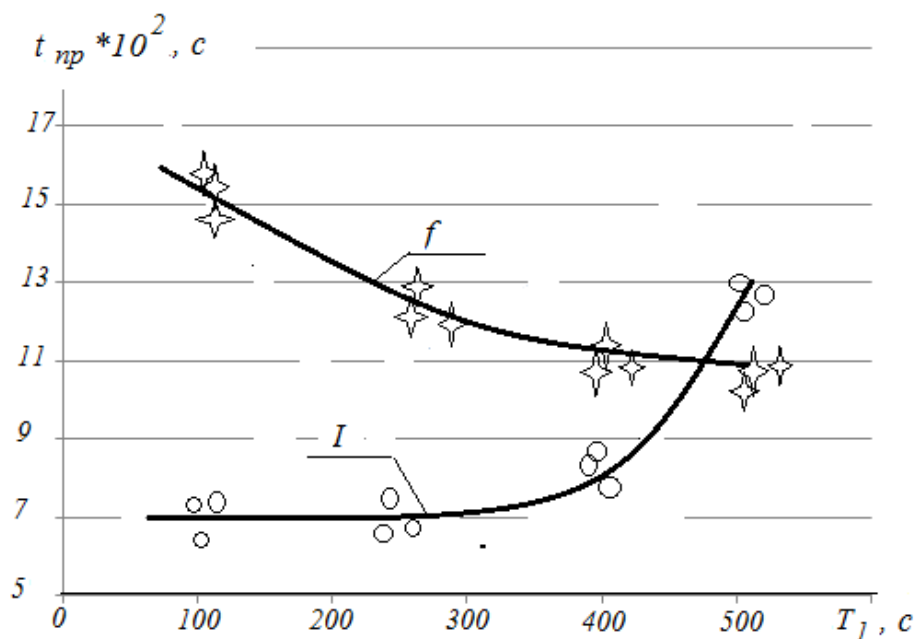


Рис. 4.11 – Залежності зміни часу припрацювання трибосистем від величини постійної часу T_1

Постійна часу T_2 визначає інерційні властивості зміни шорсткості поверхонь тертя і структури поверхневих шарів під час припрацювання або при зміні зовнішніх умов. Згідно виразу (3.57) і (3.58) постійну часу для швидкості зношування запишемо у вигляді:

$$T_{2,I} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot K_\phi \cdot h_{\partial,np}}{\dot{\epsilon}_{np}}, c, \quad (4.5)$$

– для коефіцієнта тертя:

$$T_{2,f} = \frac{7,5 \cdot 10^8 \cdot K_\phi \cdot h_{\partial,np}}{\dot{\epsilon}_{np}}, c. \quad (4.6)$$

З аналізу виразів (4.5) і (4.6) випливає, що постійна часу для коефіцієнта тертя $T_{2,f}$ в 2 рази більше, ніж $T_{2,I}$, тобто процес стабілізації коефіцієнта тертя протікає повільніше, ніж для швидкості зношування. Це характерно і для постійної часу T_1 , рис. 4.11, де видно, що при однаковому значенні T_1 час припрацювання за коефіцієнтом тертя значно більше, ніж за швидкістю зношування, особливо для малих значень T_1 .

Результати моделювання характеру зміни постійних часу $T_{2,I}$ та $T_{2,f}$ в залежності від основних параметрів, які впливають на процес припрацювання (трибологічні властивості мастильного середовища, навантаження, швидкість ковзання, шорсткість поверхонь тертя), представлені на рис. 4.12 та рис. 4.13.

Аналіз отриманих теоретичних кривих дозволяє зробити висновок, що найбільш значущим параметром, який впливає на величину постійної часу $T_{2,I}$ та $T_{2,f}$ є швидкість ковзання. Швидкість ковзання змінює величини T_2 більш, ніж в 6 разів, при цьому інші параметри викликають зміну не більше, ніж в 2 рази.

Функціональна залежність між часом припрацювання і величиною $T_{2,I}$ та $T_{2,f}$ представлена на рис. 4.14. Як випливає 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.

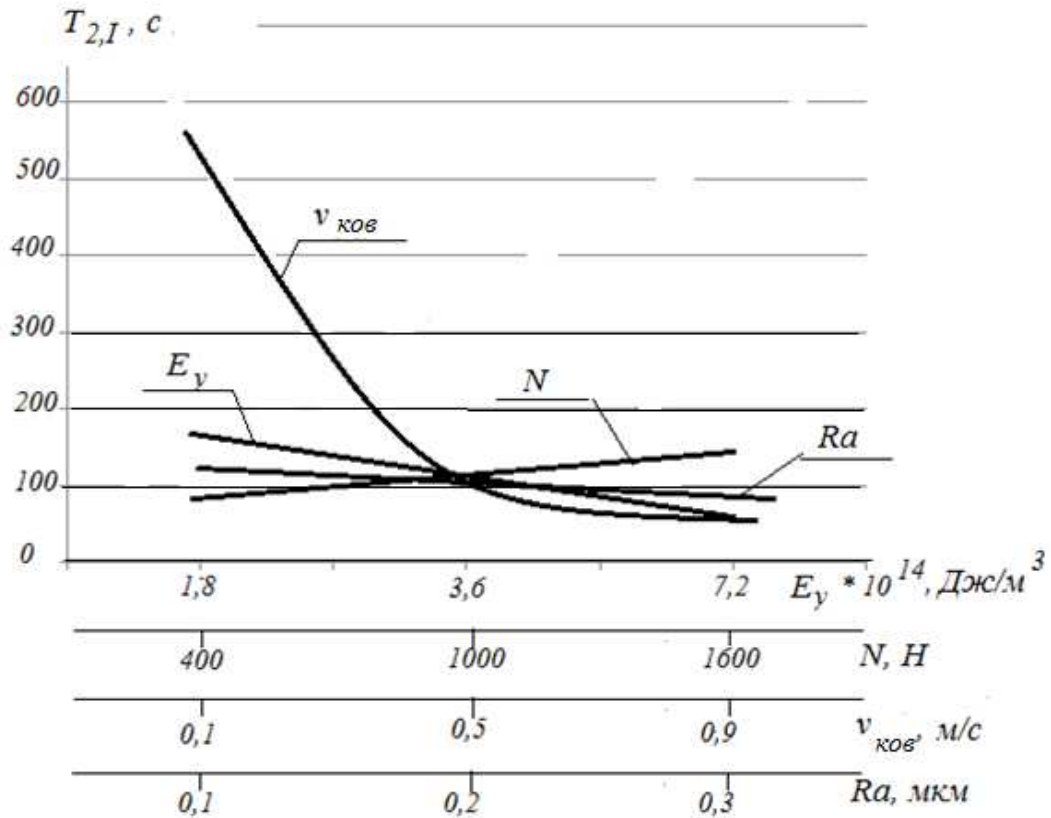


Рис. 4.12 – Залежності зміни постійної часу $T_{2,I}$ від трибологічних властивостей мастильного середовища, навантаження, швидкості ковзання та шорсткості поверхонь тертя

Характер функціональних залежностей часу припрацювання від постійних часу $T_{2,I}$ і $T_{2,f}$, рис. 4.14, був підтверджений експериментальними дослідженнями трибосистем з різними значеннями $T_{2,I}$ і $T_{2,f}$. Експериментальні точки нанесені на поле графіка (4.14) і розрахована відносна похибка моделювання, яка склала $e_t = 8,6 \dots 10,2 \%$.

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.

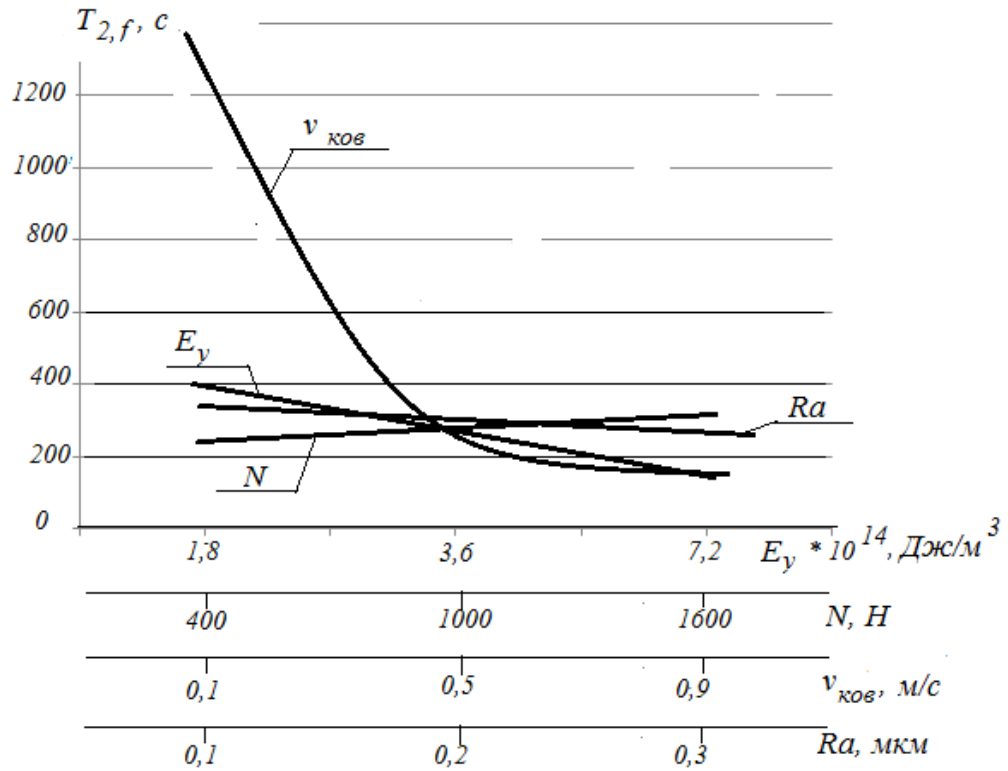


Рис. 4.13 – Залежності зміни постійної часу $T_{2,f}$ від трибологічних властивостей мастильного середовища, навантаження, швидкості ковзання та шорсткості поверхонь тертя

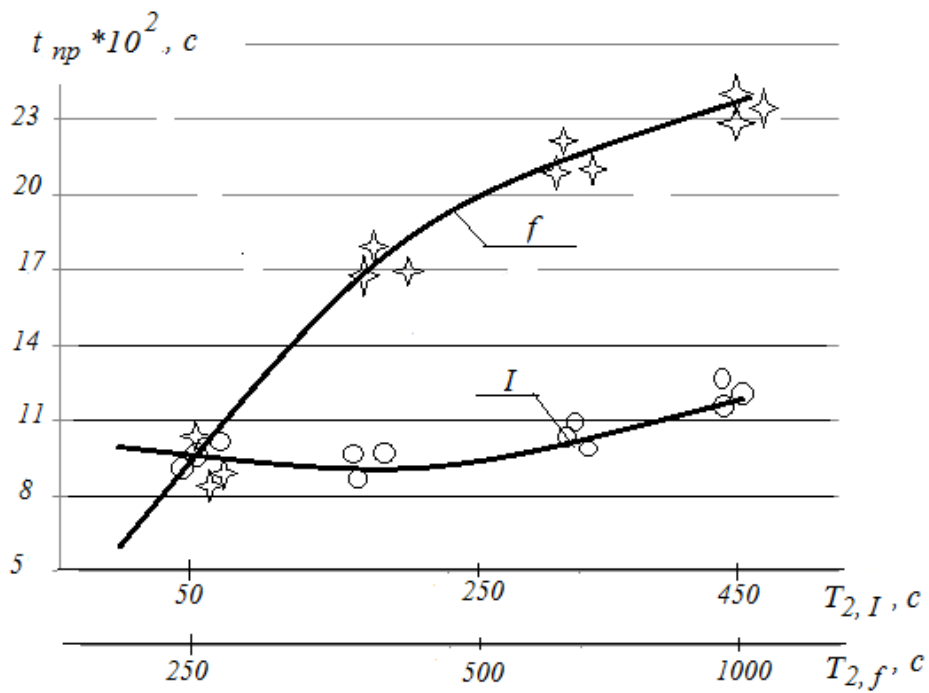


Рис. 4.14 – Залежності зміни часу припрацювання від величини постійних часу $T_{2,I}$ та $T_{2,f}$

Як впливає з наведених вище результатів, рис. 4.12 та рис. 4.13, ефективним параметром зниження $T_{2,l}$ та $T_{2,f}$ є швидкість ковзання, тому що впливає на швидкість деформації в поверхневих шарах трибоелементів, формула (3.34) та (3.35). Чим більше швидкість ковзання, тим менше значення критеріїв $T_{2,l}$ та $T_{2,f}$, це впливає з виразів (4.5) і (4.6). Отже, для швидкої перебудови структури поверхневих шарів і зміни шорсткості поверхонь тертя трибосистем необхідно виконувати припрацювання на великій швидкості ковзання.

Даний результат входить в протиріччя з висновками, отриманими для критерію чутливості трибосистеми до вхідних впливів K_1 і критерію здібності до припрацювання трибосистеми – K_2 , де зроблено висновок, що швидкість ковзання в процесі припрацювання необхідно зменшувати.

Дане протиріччя можна вирішити застосовуючи різні програми припрацювання для трибосистем. Наприклад, на першому етапі програми швидкість ковзання має мінімальне значення, що знизить чутливість до зовнішніх впливів і усуне виникнення задира, а на наступних етапах програми – збільшення швидкості ковзання, що сприятиме швидкому завершенню процесу зміни структури поверхневих шарів.

Сформульована гіпотеза про ступінчасту програму припрацювання буде підтверджена в п'ятому розділі даної дисертаційної роботи.

4.4 Критерії оцінки стаціонарності процесу припрацювання трибосистем

Під стаціонарністю процесу припрацювання будемо розуміти наявність або відсутність коливань швидкості зношування і коефіцієнта тертя щодо їх середнього поточного значення. Коливання зазначених параметрів в процесі припрацювання трибосистем пов'язані з перетворенням механічної енергії, що підводиться до трибосистеми, в теплову енергію, а також енергію структурних змін в поверхневих шарах.

Наявність або відсутність коливань в динамічних системах визначається величиною декремента загасання, вираз якого отримано при виведенні диференційних рівнянь (3.13) і (3.14).

Величина декремента загасання для перехідного процесу за параметром швидкості зношування визначається виразом (3.11), а за параметром коефіцієнта тертя, виразом (3.22). Проведені експериментальні дослідження різних трибосистем на наявність або відсутність коливань під час припрацювання, дозволили внести корективи в вирази (3.4) і (3.22).

Декремент загасання коливань швидкості зношування під час припрацювання визначається формулою (3.62):

$$d_l = \frac{T_1 + T_2 + K_1 \cdot K_2}{3,2 \cdot T_l} \quad (4.7)$$

Декремент загасання коливань коефіцієнта тертя під час припрацювання визначається формулою (3.63):

$$d_f = \frac{T_1 + T_{2f}}{3 \cdot T_f \cdot K_1 \cdot K_2} \quad (4.8)$$

З теорії ідентифікації динамічних об'єктів відомо, що при $d \geq 0,7$ коливальність в перехідному процесі відсутня, а при $d < 0,7$ в перехідному процесі присутні коливання. Результати моделювання ступеня впливу основних параметрів, які можна змінювати в процесі припрацювання, на величину декрементів загасання d_l та d_f представлені на рис. 4.15 та рис. 4.16.

Як впливає з представлених залежностей на рис. 4.15, декремент загасання швидкості зношування перебуває в межах $d_l = 0,62 \dots 0,95$, що свідчить про стаціонарність процесу. Найбільш значущими параметрами є швидкість ковзання, навантаження і мастильне середовище. При цьому збільшення швидкості ковзання і зменшення навантаження буде сприяти стаціонарності процесу (відсутність коливань) в процесі припрацювання за параметром швидкості зношування. Збільшення трибологічних властивостей мастильного середовища також збільшує стаціонарність процесу припрацювання.

Аналіз результатів моделювання зміни декременту загасання коефіцієнта тертя, рис. 4.16, дозволяє зробити висновок, що його значення менше, ніж у швидкості зношування і знаходиться в межах $d_f = 0,23 \dots 0,79$. Це говорить про те, що процес зміни коефіцієнта тертя в процесі припрацювання буде коливальним. Як випливає з представлених залежностей на рис. 4.16, найбільш значущим параметром є швидкість ковзання. Як і в попередньому випадку, збільшення швидкості ковзання призводить до стаціонарності процесу припрацювання. Але при цьому, за параметром навантаження і трибологічних властивостей мастильного середовища спостерігається зворотний зв'язок. Для відсутності коливань навантаження необхідно підвищувати, а трибологічні властивості мастильного середовища зменшувати.

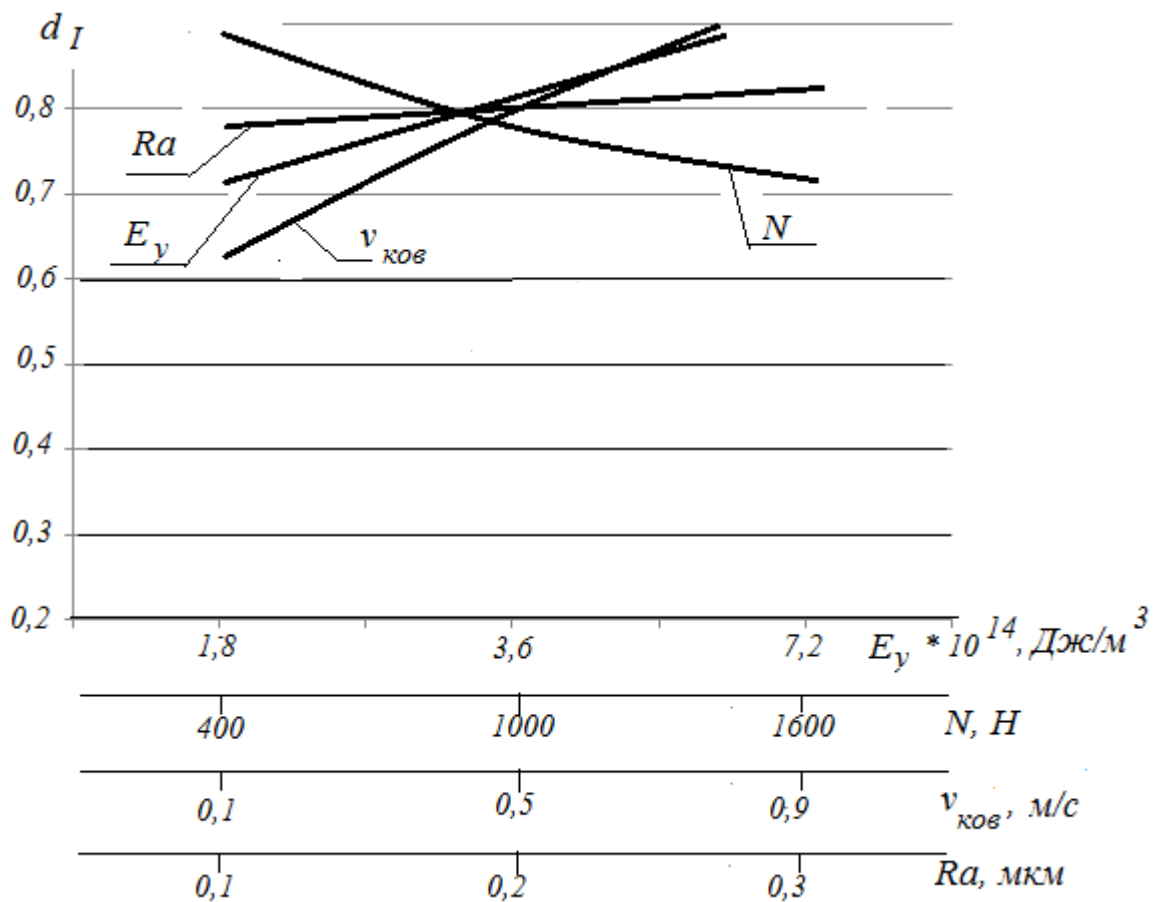


Рис. 4.15 – Залежності зміни декременту загасання d_I від трибологічних властивостей мастильного середовища, навантаження, швидкості ковзання та шорсткості поверхонь тертя

На підставі отриманих результатів моделювання можна зробити висновок, що програма припрацювання трибосистем повинна ґрунтуватися на ступінчастому принципі, де швидкість ковзання і навантаження повинні змінюватися обернено пропорційно.

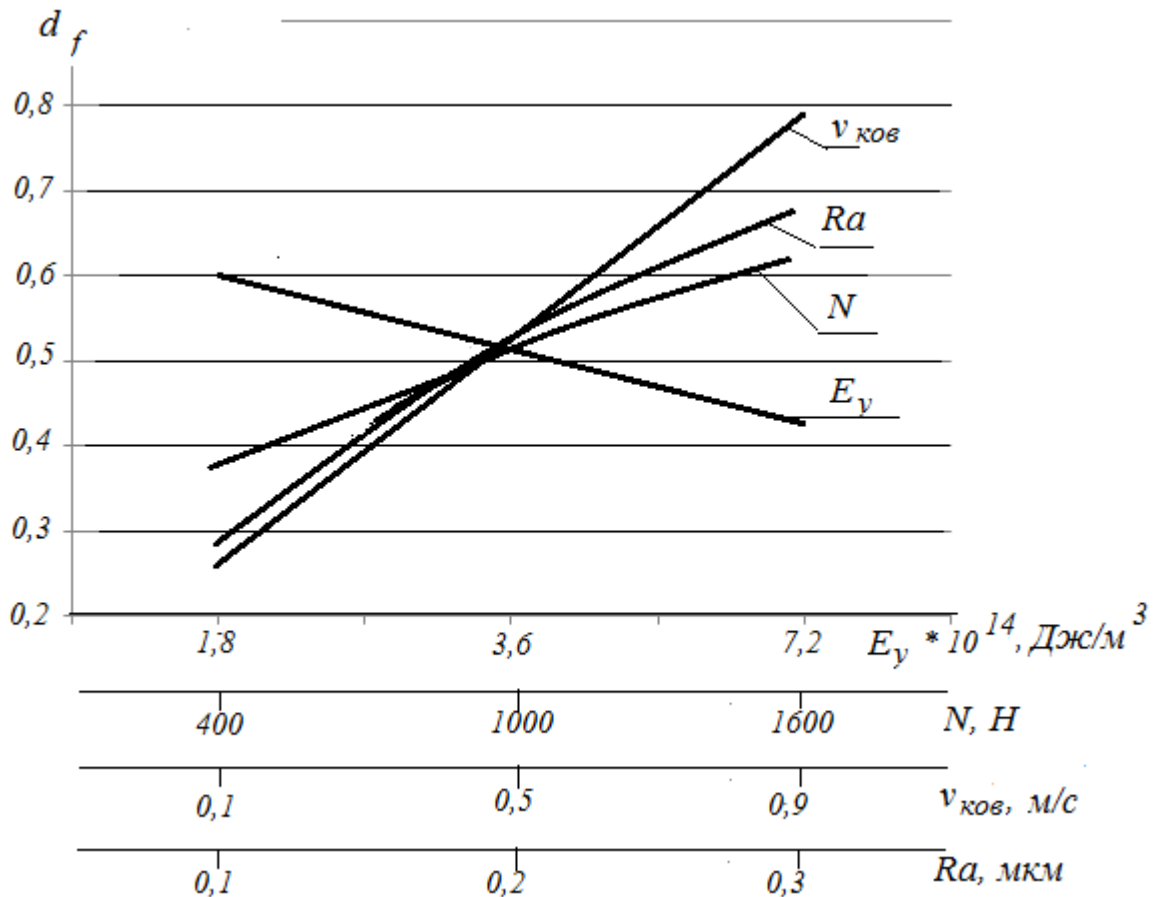


Рис. 4.16 – Залежності зміни декремента загасання d_f від трибологічних властивостей мастильного середовища, навантаження, швидкості ковзання та шорсткості поверхонь тертя

Функціональний взаємозв'язок між часом припрацювання і величинами декрементів загасання за швидкістю зношування d_l та коефіцієнтом тертя d_f , представлено на рис. 4.17.

Поруч з теоретичними кривими, які отримані шляхом моделювання, розташовані експериментальні точки, отримані при випробуванні різних трибосистем на різних режимах. Аналіз отриманих кривих дозволяє зробити висновок, що для скорочення часу припрацювання за швидкістю зношування

необхідно забезпечувати значення $d_I = 0,7 \dots 0,95$, а для коефіцієнту тертя $d_f = 0,35 \dots 0,45$. При таких значеннях декрементів загасання коливальність матиме місце тільки за параметром коефіцієнту тертя з мінімальним часом припрацювання.

Відносна похибка моделювання величини часу припрацювання по відношенню до експериментальних результатів склала $e_t = 8,8 \dots 9,2 \%$.

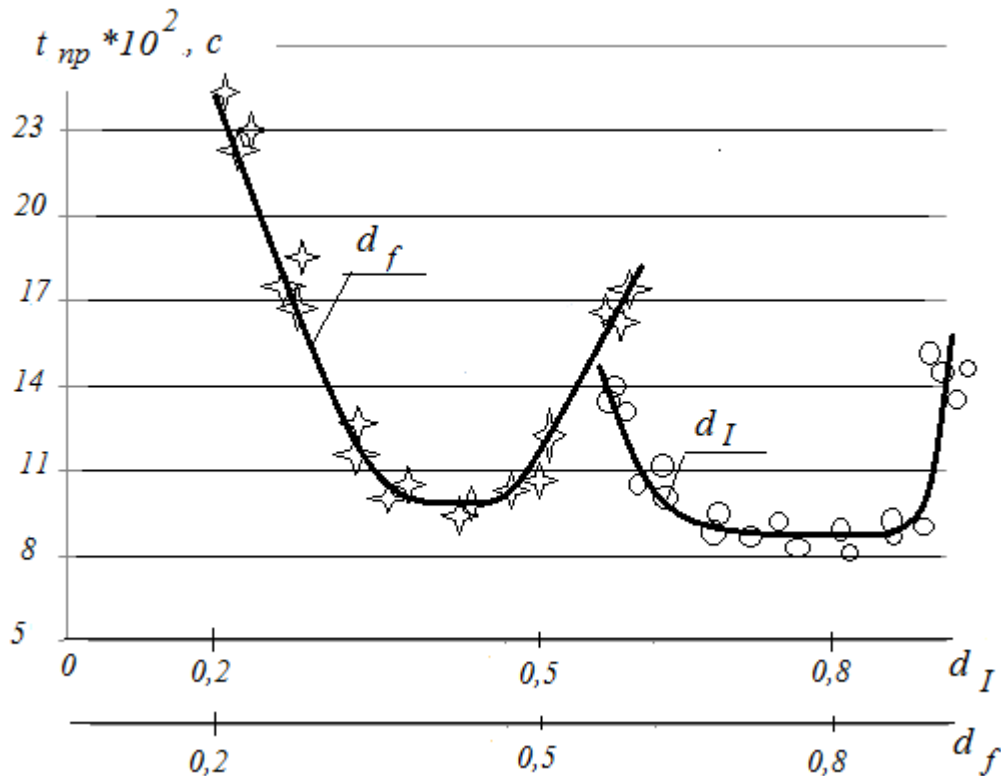


Рис. 4.17. Залежності зміни часу припрацювання від величини декрементів загасання d_I та d_f

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.

Крім цього, на величину декрементів загасання впливають і інші параметри, які можна змінювати під час проектування трибосистем – коефіцієнт форми трибосистеми і реологічні властивості структури сполучених матеріалів і їх температуропровідність.

4.5 Висновки по четвертому розділу

1. Теоретично обґрунтовані 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 .

2. Отримало подальший розвиток визначення добротності трибосистеми, яке на відміну від відомого, враховує геометричні розміри і кінематичну схему трибосистеми, температуропровідність матеріалів і швидкість поширення деформації в поверхневих шарах матеріалів трибоелементів в процесі їх контактної взаємодії. 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.

3. Встановлено взаємозв'язок між часом припрацювання і величиною добротності. Показано, що процесом припрацювання можна управляти. Для зменшення часу припрацювання необхідно зменшувати швидкість ковзання під час перехідного процесу і збільшувати трибологічні властивості мастильного середовища.

4. Отримано критерій оцінки чутливості трибосистем до зміни зовнішніх впливів в процесі припрацювання K_1 . Теоретичним і експериментальним шляхом встановлено взаємозв'язок між часом припрацювання і критерієм чутливості. Показано, що чим менше значення критерію K_1 , тим більш стійка трибосистема до зовнішніх збурень і має менший час припрацювання. Обґрунтовано шляхи зниження критерію чутливості, для цього необхідно збільшувати трибологічні властивості мастильного середовища, знижувати шорсткість поверхонь тертя і зменшувати швидкість ковзання під час припрацювання. Встановлено, що параметр навантаження не має значного впливу на зміну критерію чутливості.

5. Отримано критерій оцінки здібності трибосистеми до припрацювання K_2 . Встановлено, що на припрацювання трибосистем впливає швидкість ковзання, початкова шорсткість поверхонь тертя і мастильне середовище. Показано, що для поліпшення здатності до припрацювання трибосистем (збільшення критерію K_2), необхідно зменшувати швидкість ковзання і початкову шорсткість поверхонь тертя при одночасному збільшенні трибологічних властивостей мастильного середовища.

6. Теоретично обґрунтовані й експериментально підтверджені критерії оцінки інерційності трибосистем до зміни зовнішніх впливів. Встановлено, що мінімальні значення критерію T_1 пов'язані з швидким вирівнюванням температур по всьому об'єму трибоелементів в процесі припрацювання, а малі значення критерію T_2 – із швидкою перебудовою структури поверхневих шарів і шорсткості поверхонь тертя. Встановлено взаємозв'язок між значеннями критеріїв інерційності і часом припрацювання. Показано, що для зниження часу припрацювання необхідно зменшувати значення T_1 і T_2 , для цього необхідно зменшувати об'єми трибоелементів, підвищувати температуропровідність матеріалів і збільшувати швидкість ковзання.

7. Запропоновано критерії оцінки стаціонарності процесу припрацювання – декременти загасання за параметром швидкості зношування та коефіцієнту тертя. Встановлено, що перехідний процес за параметром швидкості зношування має значення $d_1 = 0,62 \dots 0,95$ і проходить без коливань, а за параметром

коефіцієнта тертя $d_f = 0,23 \dots 0,79$, що викликає коливання. Теоретичним і експериментальним шляхом встановлено оптимальні значення декрементів загасання: $d_l = 0,7 \dots 0,95$; $d_f = 0,35 \dots 0,45$, при яких час припрацювання трибосистем буде мінімальним. Обґрунтовано шляхи зміни величини декрементів загасання (шляхи управління процесом припрацювання), для цього необхідно збільшувати швидкість ковзання і зменшувати навантаження для мінімізації часу припрацювання за параметром швидкості зношування, збільшувати швидкість ковзання і навантаження за параметром коефіцієнта тертя. Даний висновок свідчить про необхідність розробки ступінчастої програми припрацювання, де швидкість ковзання і навантаження повинні змінюватися обернено пропорційно.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ПРИПРАЦЮВАННЯ ТРИБОСИСТЕМ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРОГРАМИ ПРИПРАЦЮВАННЯ

5.1 Обґрунтування структури програми припрацювання трибосистем

Як впливає з огляду робіт, наведених у першому розділі дисертаційної роботи, під припрацюванням будемо розуміти перехід трибосистеми з нерівноважного, термодинамічно нестійкого стану, в стаціонарний, рівноважний стан, в результаті якого стабілізуються такі параметри, як швидкість зношування, коефіцієнт тертя, температура і шорсткість поверхонь тертя. Такий перехід пов'язаний із утворенням особливої, дисипативної структури поверхневих шарів трибоелементів в результаті самоорганізації. Створення таких умов вирішується двома етапами.

На першому етапі вибирається конструкція трибосистеми (площі тертя, об'єми під площами тертя), матеріали трибоелементів (реологічні властивості структури матеріалів і їх температуропровідність), трибологічні властивості мастильного середовища. Перший етап виконується в процесі проєктування трибосистем і в процесі припрацювання і експлуатації не змінюється.

Другий етап пов'язаний із вибором програми припрацювання, яка може містити кілька режимів. Призначення режимів визначається величиною добротності трибосистеми, яка визначає величини навантаження і швидкості ковзання в процесі припрацювання. У процесі другого етапу послідовно відбувається процес перетворення механічної енергії тертя у внутрішню енергію, в першу чергу теплову, яка за рахунок температуропровідності розсіюється в навколишнє середовище, а також енергію структурних змін поверхневих шарів матеріалів трибоелементів.

Якщо величина механічної енергії (енергії активації) перевищить допустиму межу, що визначається величиною добротності, може відбутися

втрата стійкості трибосистеми, тобто настає заDIR або схоплювання поверхонь тертя трибоелементів із зупинкою трибосистеми.

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

Енергію активації або потужність, яка підводиться до трибосистеми, можна визначити виразом (3.3):

$$W = N \cdot v_{ков} = H \cdot \frac{M}{c} = Bm . \quad (5.1)$$

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 пропорційно величини навантаження N і швидкості ковзання $v_{ков}$ (забезпечуючи $W = \text{const}$), процесом припрацювання можна управляти. Це впливає з висновків четвертого розділу даної роботи.

На основі висновків четвертого розділу дисертаційної роботи виконаємо обґрунтування режимів припрацювання трибосистем.

В основу обґрунтування режимів покладемо виконання наступних умов.

1. Програма зміни навантаження і швидкості ковзання повинна забезпечувати мінімальний час завершення перехідного процесу, $t_{np} \rightarrow \text{min}$.

2. Програма припрацювання повинна забезпечувати мінімальну величину швидкості зношування на сталому режимі, тобто після завершення припрацювання, $I_{cm} \rightarrow \text{min}$.

3. Програма припрацювання повинна забезпечувати мінімальну величину коефіцієнта тертя після завершення припрацювання, $f_{cm} \rightarrow \text{min}$.

4. Програма припрацювання повинна забезпечувати мінімальну величину зносу за період припрацювання, яку можна висловити як $U \rightarrow \text{min}$.

Початок процесу припрацювання супроводжується інтенсивною деформацією шорсткостей поверхонь тертя і формуванням рівноважної шорсткості. У зв'язку з тим, що структура поверхонь тертя змінюється не миттєво, а з певною інерційністю, то трибосистема може втратити стійкість, а отже виникає задир.

Для зниження чутливості трибосистеми до задир необхідно зменшувати критерій K_1 . Одним з ефективних шляхів зменшення K_1 – це зменшення швидкості ковзання, що випливає 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 випливає з висновків четвертого розділу. На підставі виконаного обґрунтування запишемо перший режим програми припрацювання:

$$N = \max; \quad v_{\text{ков}} = \min, \quad \text{при } W = \text{const} \quad (5.2)$$

При цьому, мінімальне значення швидкості ковзання вибирається таким, щоб забезпечити оптимальні значення декрементів загасання:

$$d_l = 0,62 \dots 0,95 \text{ та } d_f = 0,23 \dots 0,79.$$

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 критерію інерційності трибосистем, згідно висновків четвертого розділу, є збільшення швидкості ковзання. На підставі наведеного обґрунтування запишемо другий режим програми припрацювання:

$$N = \min; \quad v_{\text{ков}} = \max, \quad \text{при } W = \text{const} \quad (5.3)$$

При цьому, максимальне значення швидкості ковзання вибирається з умови забезпечення оптимальних значень декрементів загасання d_l і d_f .

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 .

5.2 Моделювання процесу припрацювання трибосистеми за різними програмами

Для моделювання процесу припрацювання виберемо дві трибосистеми.

1. Трибосистема: сталь 40X (рухомий трибоелемент, $\delta_p = 2644$) + Бр. АЖ 9 - 4 (нерухомий трибоелемент, $\delta_n = 3494$). Коефіцієнт взаємного перекриття $K_{\text{вз}} = 0,5$, коефіцієнт форми $K_\phi = 12,5 \text{ }^1/\text{м}$. Мазильне середовище – моторна олива $M - 10\Gamma_2\text{к}$, трибологічні властивості $E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$. Температуропровідність сталі $a_n = 1,27 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, температуропровідність бронзи $a_n = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

2. Трибосистема: сталь 40X (рухомий трибоелемент) + сталь 40X (нерухомий трибоелемент). $K_{\text{вз}} = 0,5$, коефіцієнт форми $K_\phi = 12,5 \text{ }^1/\text{м}$. $E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$.

Виберемо експлуатаційний режим навантаження для обох трибосистем. Згідно формули (5.1) потужність, яка підводиться до трибосистеми, дорівнює:

$$W_{\text{екс}} = N \cdot v_{\text{ков}} = 1040 \cdot 0,5 = 520 \text{ Вт} \quad (5.4)$$

Прийmemo даний режим за третій режим, режим експлуатації після завершення припрацювання.

Перший режим припрацювання запишемо згідно формули (5.2):

$$W_1 = 2600 \cdot 0,2 = 520 \text{ Вт} \quad (5.5)$$

Другий режим припрацювання запишемо згідно формули (5.3):

$$W_2 = 650 \cdot 0,8 = 520 \text{ Bm} \quad (5.6)$$

Як випливає з виразів (5.4) – (5.6), для всіх трьох режимів виконується рівність $W = \text{const}$.

Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 за параметром швидкості зношування представлені на рис. 5.1, а за параметром коефіцієнта тертя, на рис. 5.2. 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 за формулою:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot t_i}{F_{mp}}, \text{ м}, \quad (5.7)$$

де n – число розбиття області під кривою на прямокутні рівномірні ділянки;

I_i – швидкість зношування на одиничній ділянці, $\text{м}^3/\text{год}$;

t_i – час роботи на одиничній ділянці, дорівнює 100 секунд;

F_{mp} – сумарна площа тертя рухомого та нерухомого трибоелементів, $0,00045 \text{ м}^2$.

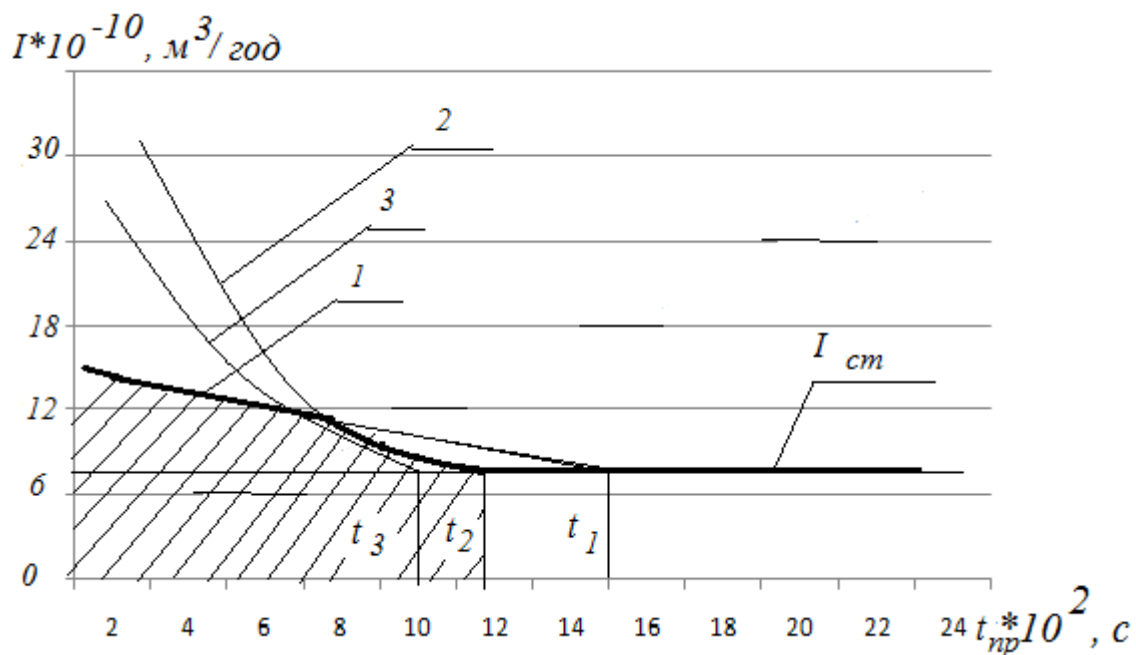


Рис. 5.1 – Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 за параметром швидкості зношування: режим 1 – режим 2

Аналіз перехідних кривих на рис. 5.1 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.

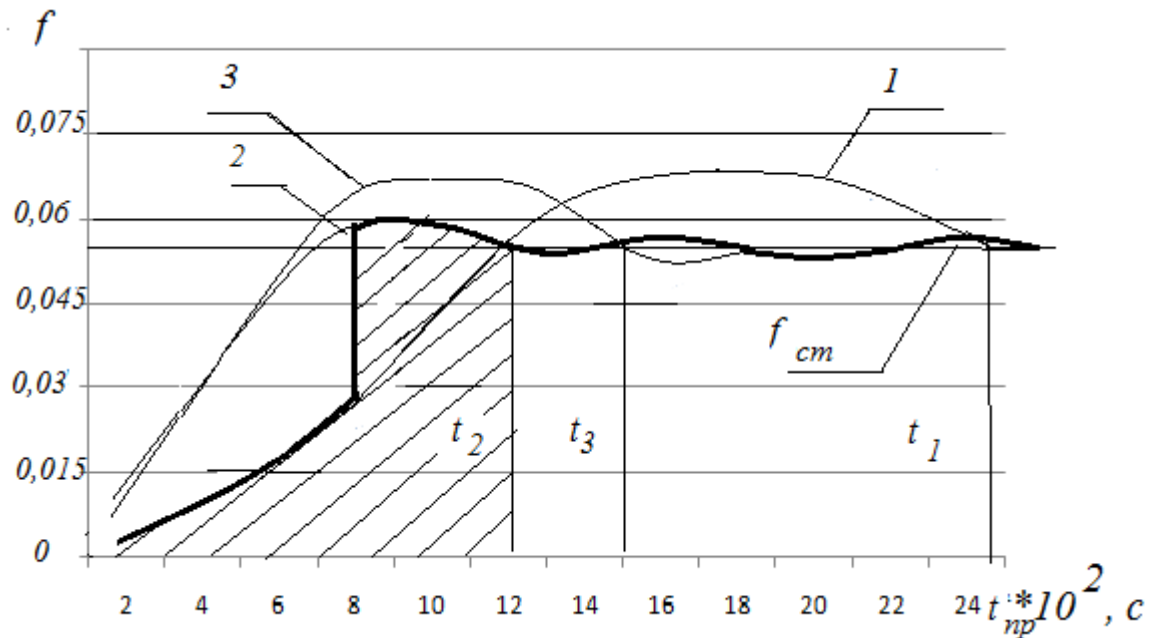


Рис. 5.2. Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 за параметром коефіцієнта тертя: режим 1 – режим 2

Аналіз перехідних кривих коефіцієнта тертя для розглянутої вище першої трибосистеми, рис. 5.2, 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. 5.1 та рис. 5.2 режимів припрацювання, дозволяє обґрунтувати програму припрацювання трибосистеми при виконанні умов: $U \rightarrow \min$, $t_{np} \rightarrow \min$. Згідно рис. 5.1, 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. 5.1 жирною лінією. Сумарний знос за припрацювання (площа під жирної кривої) складе $U = 0,840$ мкм, а період припрацювання $t_{np} = 1100$ с.

Величини декрементів загасання для швидкості зношування на першому режимі рівні $d_I = 0,62$, а на другому режимі $d_I = 0,98$. Це свідчить про те, що на початку процесу присутні незначні коливання, а в кінці процесу – коливання відсутні.

Величини декрементів загасання для коефіцієнта тертя на першому режимі рівні $d_f = 0,52$, а на другому режимі $d_f = 0,64$. Це свідчить про те, що процес припрацювання за коефіцієнтом тертя відбувається з коливаннями, величина яких по завершенню припрацювання загасає.

Аналіз кривих на рис. 5.1 свідчить, що більш раціональною програмою є перехід з режиму 1 на режим 3. При такому варіанті $t_{np} = 900$ с. Однак така програма значно збільшує час припрацювання за коефіцієнтом тертя, до $t_{np} = 1400$ с, рис. 5.2.

Процес припрацювання за програмою: перший режим (час припрацювання 700 с), потім другий режим, назвемо першою програмою, яка дозволить завершити перехідний процес до стабілізації коефіцієнта тертя за 1100 с. Така програма зображена на рис. 5.2 жирною лінією. При цьому час припрацювання до стабілізації швидкості зношування і коефіцієнта тертя збігається і дорівнює $t_{np} = 1100$ с.

Розглянемо припрацювання трибосистеми за режимом 1, а потім перехід на режим 3. Така програма значно збільшить час припрацювання за коефіцієнтом тертя, який дорівнює $t_3 = 1400$ с, рис. 5.2.

Обґрунтована за результатами моделювання програма припрацювання в подальшому буде підтверджена експериментально.

Для порівняння розглянемо зворотну програму припрацювання (друга програма), де режими навантаження застосуємо в зворотному порядку.

1. Режим 2: $N = 650$ Н; $v_{ков} = 0,8$ м/с.

2. Режим 1: $N = 2600$ Н; $v_{ков} = 0,2$ м/с.

Результати моделювання перехідних процесів в трибосистемі сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 наведені на рис. 5.3 та рис. 5.4.

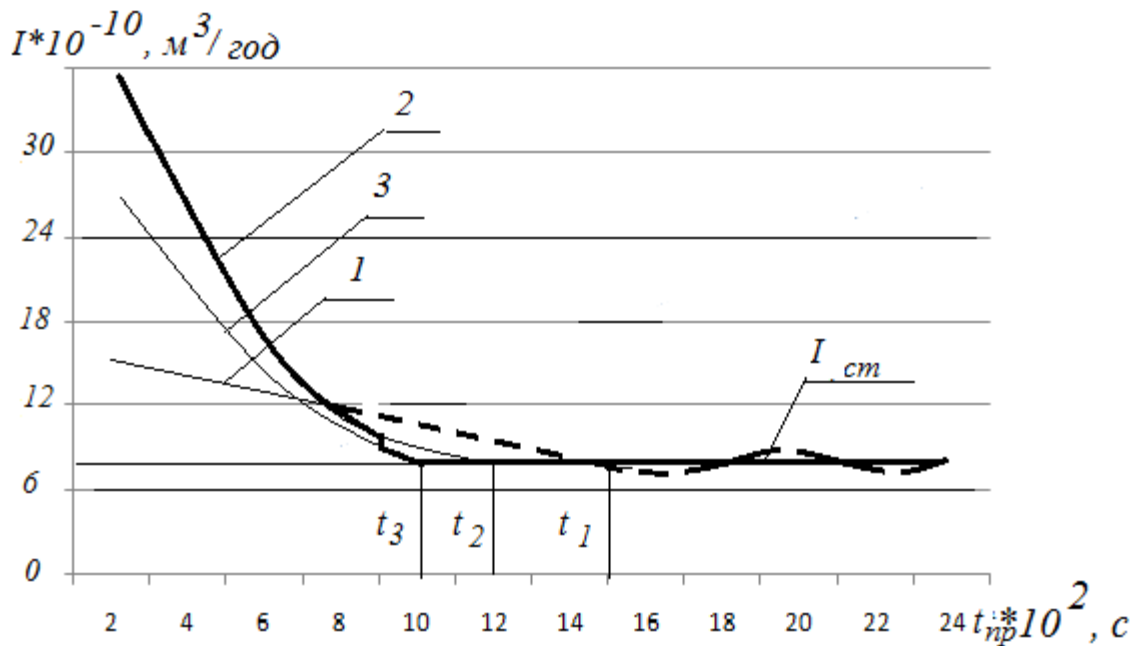


Рис. 5.3 – Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 за параметром швидкості зношування при застосуванні програми: режим 2 – режим 1

Аналіз кривих на рис. 5.3 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.5.4, складе 2400 с. Така програма припрацювання зображена на рис. 5.3 та рис. 5.4 жирною пунктирною лінією.

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.

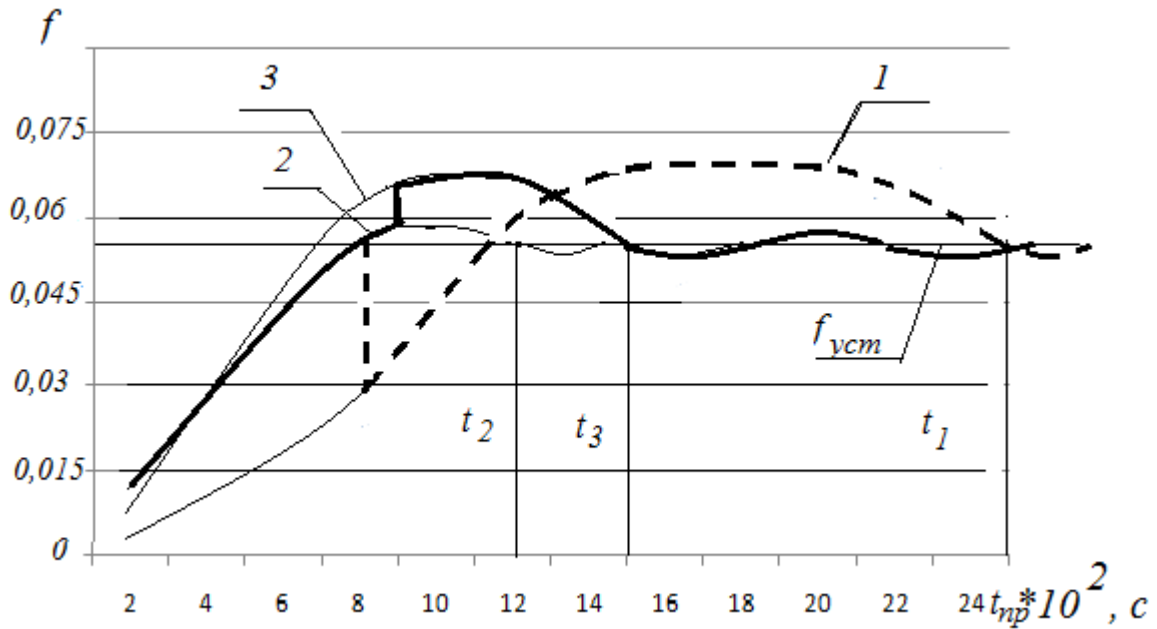


Рис. 5.4 – Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 за параметром коефіцієнту тертя при застосуванні програми: режим 2 – режим 1

Величини декрементів загасання для перехідних процесів на режимі 2 дорівнюють $d_I = 0,98$, $d_f = 0,64$. Це свідчить про відсутність коливань у параметра швидкості зношування і наявність незначних коливань у параметра коефіцієнта тертя. При переході з другого режиму на перший, величини декрементів загасання дорівнюють $d_I = 0,62$, $d_f = 0,52$. Це свідчить про те, що в перехідних процесах, як за швидкістю зношування, так і за коефіцієнтом тертя з'являється коливальність. Раціональнішою програмою для розглянутих перехідних характеристик є наступна послідовність режимів: режим 2 – режим 3. Така програма, (третья програма), зображена на рис. 5.3 та рис. 5.4 жирною суцільною лінією. При такій програмі знос за припрацювання складе $U = 1,083$ мкм, час припрацювання за параметром швидкості зношування $t_{np} = 900$ с, а час припрацювання до стабілізації коефіцієнта тертя складе $t_{np} = 1400$ с.

За результатами проведеного моделювання можна зробити висновок, що з розглянутих трьох варіантів програм припрацювання трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 найбільш ефективною є перша програма: режим 1 – режим 2, а

потім перехід на 3 режим – режим експлуатації. Як зазначалося вище, при такій послідовності знос за період припрацювання матиме мінімальне значення $U = 0,840$ мкм, а час стабілізації величин швидкості зношування та коефіцієнта тертя $t_{np} = 1100$ с.

Ефективність застосування першої програми припрацювання підтверджена на прикладі другої трибосистеми: сталь 40X + сталь 40X. Перехідні характеристики швидкості зношування представлені на рис. 5.5, а коефіцієнта тертя, на рис. 5.6.

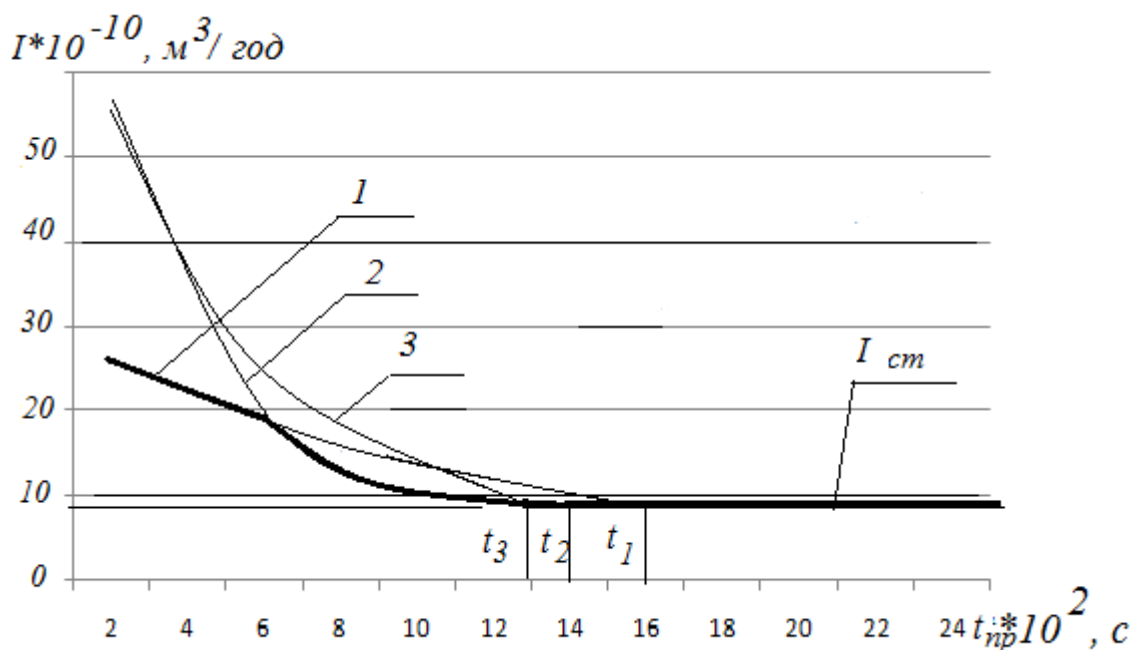


Рис. 5.5 – Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + сталь 40X за параметром швидкості зношування: режим 1 – режим 2

Як впливає з аналізу кривих на рис. 5.5, початок припрацювання за кривою 1 (режим 1), а потім перехід на перетині кривих на криву 2 (режим 2), забезпечить мінімальний знос за припрацювання (площа під жирною кривою), що дорівнює $U = 1,249$ мкм, при середньому часу припрацювання $t_2 = 1300$ с. Для порівняння: знос за припрацювання під кривою 1 дорівнює $U_1 = 1,566$ мкм; під кривою 2 дорівнює $U_2 = 1,424$ мкм; під кривою 3 дорівнює $U_3 = 1,849$ мкм.

Аналіз перехідних характеристик коефіцієнта тертя, рис. 5.6, дає підстави для твердження, що перехід з кривої 1 на криву 2 забезпечить мінімальний час припрацювання, який дорівнює $t_2 = 1400$ с.

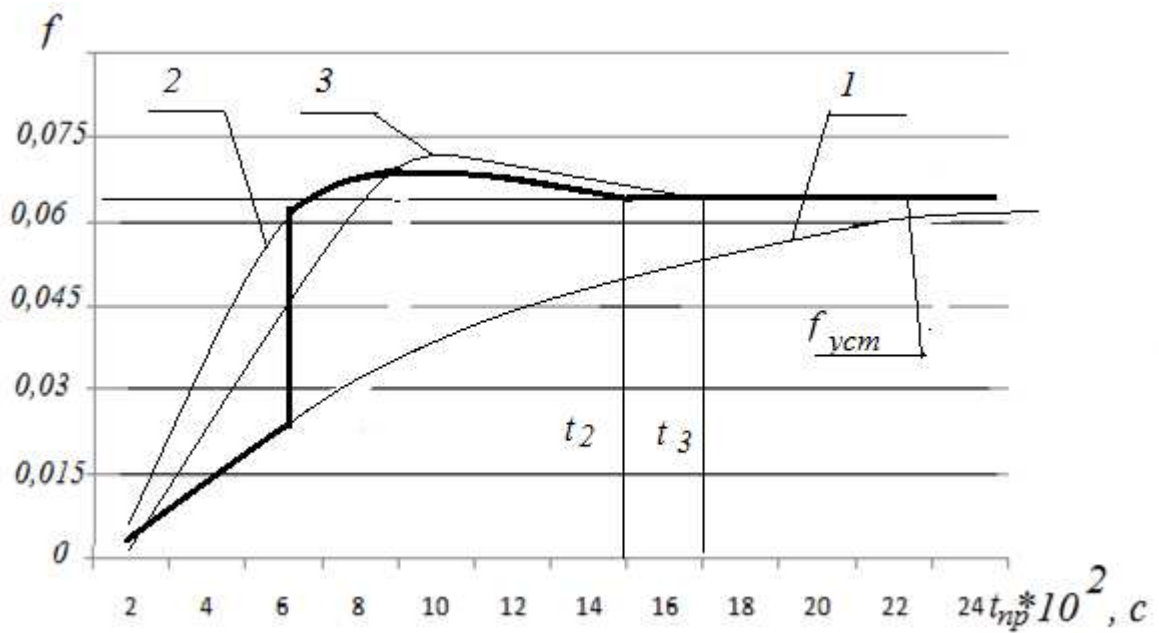


Рис.5.6 – Перехідні характеристики процесу припрацювання трибосистеми сталь 40X + сталь 40X за параметром коефіцієнта тертя: режим 1 – режим 2

Аналіз зміни величини декрементів загасання показує, що d_f на першому режимі дорівнює 0,62, а на другому режимі 1,07. Це свідчить про зменшення коливань в перехідному процесі швидкості зношування і їх відсутності в кінці припрацювання.

Для перехідного процесу коефіцієнта тертя на першому режимі $d_f = 0,53$, а на другому режимі $d_f = 0,73$. Це свідчить про те, що коливальність коефіцієнта тертя присутня тільки на початку процесу припрацювання, а в кінці процесу коливання відсутні.

5.3 Експериментальна перевірка програми припрацювання трибосистем

У попередніх підрозділах 5.1 та 5.2 була обґрунтована і за допомогою математичного моделювання підтверджена програма припрацювання трибосистем. Програма складається з двох режимів.

На першому режимі припрацювання забезпечується максимальне навантаження, що перевищує навантаження в процесі експлуатації, і мінімальна швидкість ковзання, яка значно нижче експлуатаційної. Даний режим був записаний у вигляді виразу (5.2).

На другому, завершальному режимі припрацювання, забезпечується мінімальне навантаження, яке нижче експлуатаційного, і максимальна швидкість ковзання, яка значно вище експлуатаційної. Даний режим був записаний у вигляді виразу (5.3).

Особливістю програми припрацювання є рівність потужностей, які підводяться до трибосистеми на першому режимі W_1 , другому режимі W_2 і на режимі експлуатації $W_{екс}$:

$$W_1 = W_2 = W_{екс} = const \quad (5.8)$$

Метою даного підрозділу є експериментальним шляхом підтвердити результати моделювання, отримані в підрозділі 5.2, а отже, підтвердити ефективність програми припрацювання.

Експериментальні дослідження проводилися на двох трибосистемах: сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 та сталь 40X + сталь 40X. Параметри трибосистем та мастильне середовище є однотипними тим, які застосовувалися при моделюванні і викладені в підрозділі 5.2 у вигляді першої і другої трибосистем.

В процесі експерименту, через кожні 100 секунд, реєстрували значення моменту тертя, який перераховували в коефіцієнт тертя, а також значення потужності акустичної емісії, за величиною якої визначали швидкість зношування. Час припрацювання визначали за стабілізацією швидкості зношування і коефіцієнта тертя щодо сталого значення.

Результати експериментів на кожній з програм повторювали 3 рази, з розрахунком значень критерію Кохрена для підтвердження відтворюваності результатів від досліду до досліду. Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4 при застосуванні першої програми представлено в таблиці 5.1.

Відносна похибка результатів моделювання і експерименту визначалася за виразами (3.51) для швидкості зношування e_I , (3.52) для коефіцієнта тертя e_f і (3.53) для часу припрацювання e_t .

Таблиця 5.1 – Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, $K_\phi = 12,5$ л/м, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³: режим 1 – режим 2

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10}, m^3/год$	$I_{екс} \cdot 10^{-10}, m^3/год$ (середнє значення)	$e_I, \%$	f_m	$f_{екс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
Перший режим $N = 2600$ Н, $v_{ков} = 0,2$ м/с						
100	14,8	16,2	8,6	0,0011	0,0012	8,3
200	14,5	16,2	10,4	0,0042	0,0044	9,0
300	14,0	15,6	10,2	0,0088	0,0091	2,2
400	13,47	14,5	7,1	0,014	0,015	6,6
500	12,8	13,4	4,4	0,02	0,022	9,0
600	12,2	12,8	4,6	0,026	0,028	7,1
700	11,6	11,8	1,7	0,033	0,03	10,0
Другий режим $N = 650$ Н, $v_{ков} = 0,8$ м/с						
800	9,95	9,0	10,5	0,057	0,055	3,6
900	9,39	9,0	4,3	0,057	0,055	3,6
1000	9,06	8,8	2,9	0,055	0,052	5,7
1100	8,87	8,6	3,1	0,054	0,051	5,8
Параметри стаціонарного процесу тертя						
1200	8,87	8,6	3,1	0,054	0,051	5,8

Аналіз результатів таблиці 5.1 дозволяє зробити висновок, що похибка моделювання процесу припрацювання за параметром швидкості зношування не перевищує $e_I = 10,5 \%$, за параметром коефіцієнта тертя $e_f = 10,0 \%$. Похибка моделювання часу припрацювання $e_t = 8,3 \%$.

На початку процесу припрацювання (на першому режимі згідно таблиці 5.1) присутні коливання як швидкості зношування, так і коефіцієнта тертя. В кінці процесу припрацювання (на другому режимі), коливання по параметру швидкості зношування відсутні, а по параметру коефіцієнта тертя залишаються. Дані експериментальні факти збігаються з результатами моделювання.

Порівняння результатів моделювання і експерименту для аналогічної трибосистеми при застосуванні другої (зворотної) програми припрацювання, представлено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, $K_{\phi} = 12,5$ л/м, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³: режим 2 – режим 1

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{екс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{екс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
Другий режим $N = 650$ Н, $v_{ков} = 0,8$ м/с						
100	38,2	43,0	11,1	0,0027	0,0029	6,8
200	30,6	34,0	10,0	0,023	0,025	8,0
300	23,7	27,0	12,2	0,037	0,042	11,9
400	18,4	21,0	12,3	0,048	0,054	11,1
500	14,8	17,0	12,9	0,054	0,06	10,0
600	12,4	13,0	4,6	0,057	0,064	10,9
700	10,88	10,0	8,8	0,057	0,062	8,0
Перший режим $N = 2600$ Н, $v_{ков} = 0,2$ м/с						
800	10,3	9,8	5,1	0,039	0,042	7,1
900	10,05	9,6	4,6	0,044	0,048	8,3
1000	10,0	9,4	6,3	0,049	0,053	7,5
1100	9,6	9,2	4,3	0,053	0,057	7,0
1200	9,2	9,0	2,2	0,057	0,06	5,0
1300	8,9	8,4	5,9	0,06	0,064	6,2
1400	8,84	8,6	2,7	0,062	0,066	6,0
1500	8,82	8,6	2,5	0,063	0,07	10,0
1600	8,8	8,6	2,3	0,064	0,072	12,1
1700	8,82	8,6	2,5	0,065	0,076	14,4
1800	8,84	8,6	2,8	0,065	0,072	9,7
1900	8,86	8,7	1,8	0,064	0,072	11,1
2000	8,88	9,0	1,3	0,064	0,072	12,1

Продовження таблиці 5.2

2100	8,88	9,2	3,4	0,063	0,071	11,2
2200	8,86	9,3	4,7	0,062	0,068	8,8
2300	8,84	9,3	4,9	0,061	0,064	4,6
2400	8,82	9,2	4,1	0,06	0,062	3,2
2500	8,8	9,0	2,2	0,059	0,06	1,6
2600	8,8	9,0	2,2	0,059	0,062	4,8
2700	8,82	9,2	4,1	0,058	0,064	9,3
2800	8,84	9,3	4,9	0,056	0,066	13,6
Параметри стаціонарного процесу тертя						
2900	8,8	9,0	2,2	0,056	0,06	6,6

Аналіз результатів моделювання і експерименту дозволяє зробити висновок, що при застосуванні другої програми похибка моделювання збільшується. Для швидкості зношування дорівнює $e_l = 12,9\%$, для коефіцієнта тертя $e_f = 14,4\%$. При цьому спостерігається значна коливальність процесу припрацювання, як за параметром швидкості зношування, так і за параметром коефіцієнта тертя. Похибка моделювання часу припрацювання за швидкістю зношування становить $e_t = 12,5\%$, а за коефіцієнтом тертя $e_t = 12,0\%$.

Результати експерименту підтверджують отриманий шляхом моделювання висновок, що друга (зворотна) програма припрацювання, яка починається з другого режиму ($N = 650$ Н; $v_{ков} = 0,8$ м/с), а потім перехід на перший режим ($N = 2600$ Н; $v_{ков} = 0,2$ м/с), не є ефективною, в порівнянні з першою програмою.

Порівняння результатів моделювання і експерименту для аналогічної трибосистеми при застосуванні третьої програми, представлені в таблиці 5.3.

Відмінності даної програми від раніше представлених полягають в тому, що припрацювання здійснюється при ступінчастому збільшенні навантаження до експлуатаційного, при дотриманні умов $W = \text{const}$.

Як випливає з представлених в таблиці 5.3 результатів, похибка моделювання за параметром швидкості зношування становить $e_l = 14,2\%$, а за коефіцієнтом тертя $e_f = 11,5\%$. Похибка моделювання за часом припрацювання не перевищує $8,0\%$.

Експериментальні дослідження дозволили встановити, що на початку процесу припрацювання коливання, як за швидкістю зношування, так і за коефіцієнтом тертя, відсутні. Після переходу з другого режиму на третій, з'являються коливання тільки у коефіцієнта тертя, що відповідає висновкам за результатами моделювання, представленим в підрозділі 5.2.

Таблиця 5.3 – Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40X + Бр.АЖ 9 - 4, $K_{\phi} = 12,5$ л/м, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³: режим 2 – режим 3

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10}, m^3/год$	$I_{екс} \cdot 10^{-10}, m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{екс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
Другий режим $N = 650$ Н, $v_{ков} = 0,8$ м/с						
100	38,2	42,0	9,0	0,0027	0,003	10,0
200	30,6	33,0	10,9	0,023	0,026	11,5
300	23,7	26,0	14,2	0,037	0,04	7,5
400	18,4	20,0	12,0	0,048	0,052	7,6
500	14,8	16,0	7,5	0,054	0,059	8,4
600	12,4	13,5	8,1	0,057	0,061	6,5
700	10,88	10,0	8,8	0,057	0,062	8,0
Третій режим $N = 1040$ Н, $v_{ков} = 0,5$ м/с						
800	9,19	9,0	2,1	0,061	0,063	3,1
900	8,65	8,5	1,7	0,061	0,063	3,1
1000	8,37	8,0	4,6	0,06	0,062	3,2
1100	8,27	8,0	3,3	0,059	0,06	1,6
1200	8,27	8,0	3,3	0,057	0,058	1,7
1300	8,32	8,0	4,0	0,056	0,057	1,7
1400	8,63	8,5	1,5	0,054	0,055	1,8
Параметри стаціонарного процесу тертя						
1500	8,65	8,5	1,7	0,054	0,055	1,8

Порівняння результатів моделювання при застосуванні першої програми для іншої конструкції трибосистеми, у якій змінено сполучення матеріалів: сталь 40X + сталь 40X, представлено в таблиці 5.4.

Результати експерименту та їх порівняння з результатами моделювання дозволяють стверджувати, що похибки моделювання не перевищують 14,2 %.

При цьому, на першому режимі припрацювання спостерігається коливальність процесу по параметру швидкості зношування і за коефіцієнтом тертя. При переході на другий режим, коливальність по обох параметрах відсутня, що відповідає результатам моделювання.

Проведені експериментальні дослідження процесів припрацювання різних конструкцій трибосистем за трьома різними програмами дозволяють підтвердити ефективність застосування першої програми. При застосуванні такої програми похибка моделювання не перевищує значень 8,3 ... 14,2 %.

Таблиця 5.4 – Порівняння результатів моделювання і експерименту для трибосистеми сталь 40Х + сталь 40Х, $K_{\phi} = 12,5 \text{ л/м}$, мастильне середовище $E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$: режим 1 – режим 2

Час процесу припрацювання $t, \text{ с}$	$I_m \cdot 10^{-10}, \text{ м}^3/\text{год}$	$I_{\text{екс}} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^3/\text{год}$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{\text{екс}}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
Перший режим $N = 2600 \text{ Н}$, $v_{\text{ков}} = 0,2 \text{ м/с}$						
100	25,4	29,0	12,4	0,006	0,0065	7,6
200	24,6	28,0	12,1	0,012	0,014	14,2
300	23,6	26,0	9,2	0,017	0,019	10,5
400	22,3	24,0	7,0	0,022	0,024	8,3
500	20,8	22,0	5,4	0,026	0,028	7,1
Другий режим $N = 650 \text{ Н}$, $v_{\text{ков}} = 0,8 \text{ м/с}$						
600	12,2	14,0	12,8	0,064	0,066	3,0
700	11,1	12,0	7,5	0,064	0,067	4,4
800	10,5	11,0	4,5	0,065	0,068	4,4
900	10,15	10,5	1,5	0,064	0,066	3,0
1000	9,96	9,0	3,3	0,064	0,062	3,2
1100	9,86	9,5	3,7	0,063	0,061	3,2
1200	9,8	9,0	8,8	0,063	0,06	5,0
1300	9,76	9,0	8,4	0,063	0,06	5,0
1400	9,75	9,5	2,6	0,062	0,06	3,3
Параметри стаціонарного процесу тертя						
1500	9,76	9,0	8,4	0,062	0,06	3,3

5.4 Розробка програми обкатки шестеренних насосів НШ - 10

Насоси шестеренні НШ – 10 застосовуються для нагнітання гідравлічної рідини (мінеральної оливи) в гідравлічних системах тракторів, навантажувачів, сільськогосподарських машин, автомобілів. Насоси випускаються як лівого, так і правого обертання.

Конструкція шестеренного насоса представлена на рис. 5.7.

Технічні характеристики насосів НШ – 10 представлені в таблиці 5.5.

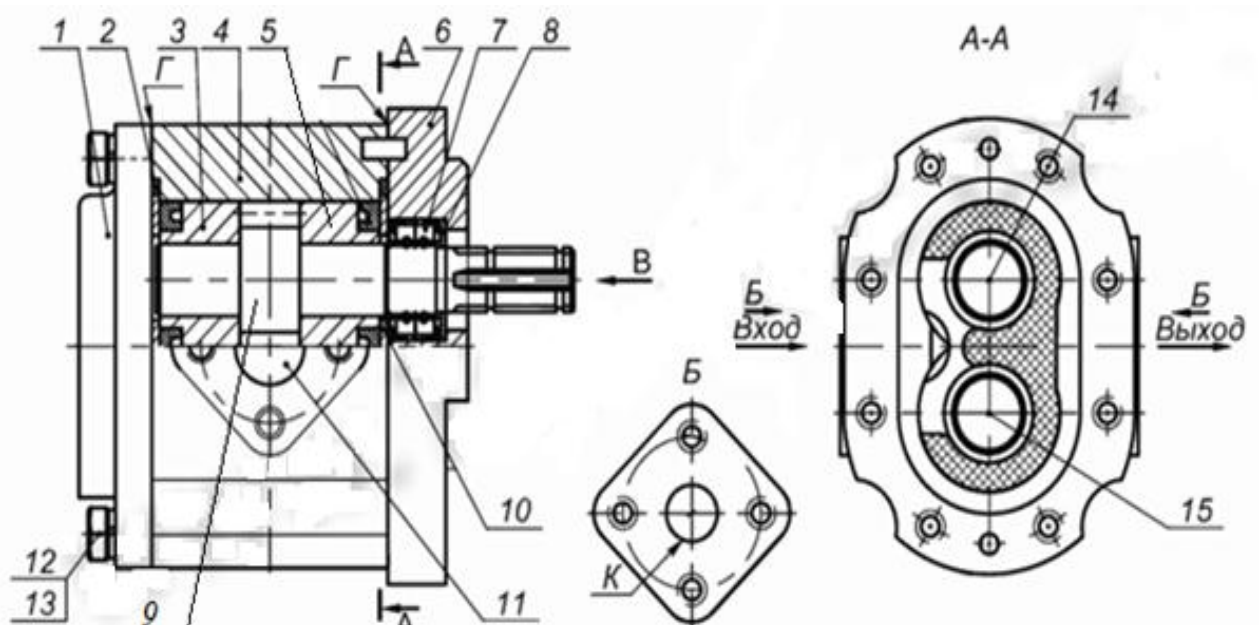


Рис. 5.7 – Конструкція шестеренного насоса

1 – кришка задня; 2 – кільце ущільнювача; 3 – букса опорна ліва; 4 – корпус насоса; 5 – букса опорна права; 6 – кришка передня; 7 – манжета армована; 8 – кільце; 9 – зубчасте колесо; 10 – пластина; 11 – фланець; 12 – гвинт; 13 – шайба; 14 – вал ведучий; 15 – вал відомий.

Таблиця 5.5 – Технічні характеристики насосів НШ - 10

Позначення	Робочий об'єм, см ³	Номінальна частота обертання с ⁻¹	Номінальна подача, л/хв	Номінальний тиск, МПа	Максимальний тиск, МПа	Коефіцієнт подачі
НШ-10 Г-3	10	40	21	16	21	0,92
НШ-10 У-3	10	40	21	16	21	0,92

В процесі роботи насоса робоча рідина перетікає із зони високого тиску (на рис. 5.7 – Вихід) в зону низького тиску (Вхід) по площині торкання робочого зубчастого колеса 9 з буксої лівої 3 і буксої правої 5. Аналогічні витoki робочої рідини відбуваються по з'єднанню зубчастого колеса і букс на нижньому – відомому валові 15.

Витoki робочої рідини визначають величину коефіцієнта подачі насоса. Як впливає з таблиці 5.5, коефіцієнт подачі у нових насосів не менше 0,92, тобто 8 % робочої рідини перетікає із зони високого тиску в зону низького тиску по площинах торкання зубчастих коліс відомого і ведучого валів з чотирма буксами (дві ліві і дві праві).

В процесі експлуатації за рахунок зношування робочих торців букс, які виготовляються з бронзи, відбувається збільшення зазору між торцями зубчастого колеса і буксами, що призводить до збільшення витоків робочої рідини. Згідно ДСТУ 2192-93 «Гідроприводи об'ємні. Насоси об'ємні та гідромотори. Загальні технічні умови», при збільшенні витоків до значень 20% насос необхідно зняти з експлуатації.

Для збільшення коефіцієнта подачі насосів, а отже для збільшення ресурсу насосів, завод – виробник проводить обкатку насосів на стенді перед відправкою замовнику.

Типова заводська програма обкатки насосів складається з ступеневого збільшення тиску насосом при постійних робочих обертах ведучого валу. Програма складається з чотирьох ступенів навантаження.

1. Тиск робочої рідини за насосом 4 МПа; частота обертання 40 с^{-1} ; час роботи 10 хвилин.

2. Тиск робочої рідини за насосом 8 МПа; частота обертання 40 с^{-1} ; час роботи 10 хвилин.

3. Тиск робочої рідини за насосом 12 МПа; частота обертання 40 с^{-1} ; час роботи 10 хвилин.

4. Тиск робочої рідини за насосом 16 МПа; частота обертання 40 с^{-1} ; час роботи 10 хвилин.

Сумарний час обкатки насоса становить 40 хвилин. В процесі обкатки насоса відбувається припрацювання торцевих поверхонь зубчастих коліс і опорних букс і перехід від технологічної шорсткості до експлуатаційної.

Виконуємо моделювання швидкості зношування і коефіцієнта тертя, а також величини зносу за припрацювання для типової заводської програми обкатки. Вихідними даними для моделювання є геометричні розміри і матеріали букс і зубчастих коліс, які наведені в конструкторській документації на насос.

Результати моделювання представлені на рис. 5.8 та рис. 5.9. На підставі отриманої залежності швидкості зношування, з урахуванням площі тертя рухомого зубчастого колеса $F_{тр,р} = 0,001314\text{м}^2$ і площі тертя нерухомої букси $F_{тр,н} = 0,002194\text{ м}^2$, знос за припрацювання складе $U = 3,48\text{ мкм}$. Час припрацювання $t_{np} = 2400\text{ с}$.

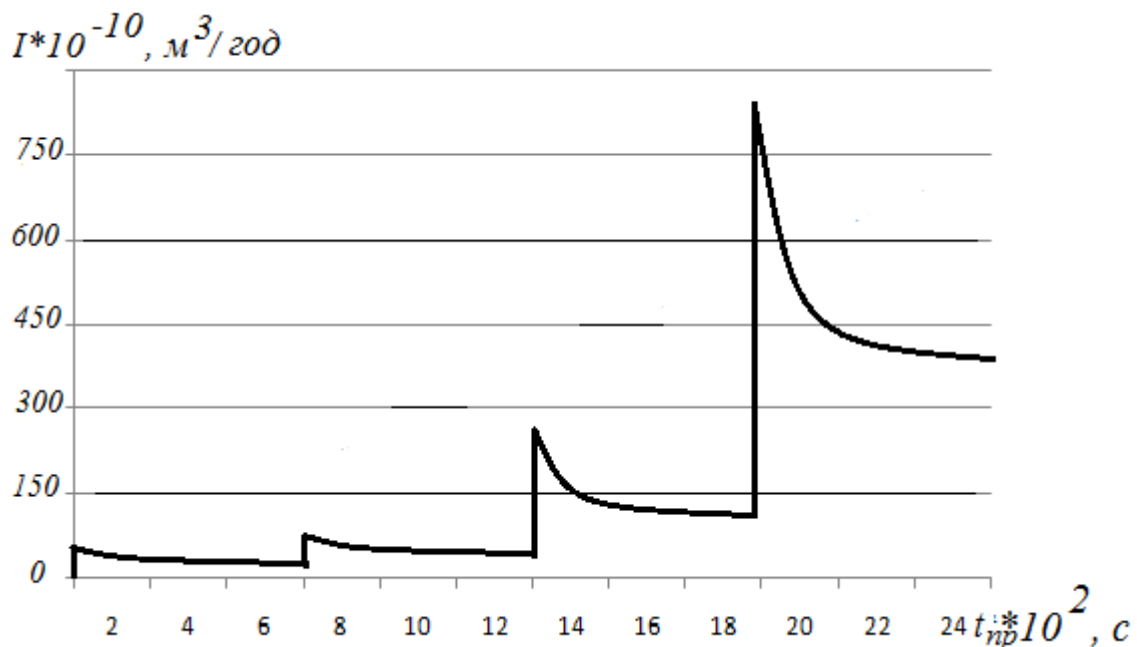


Рис. 5.8 – Залежність зміни швидкості зношування при застосуванні ступінчастої програми обкатки шестеренного насоса НШ – 10

Залежність зміни коефіцієнта тертя представлена на рис. 5.9. Як впливає з характеру залежності, при ступінчастому збільшенні навантаження протягом 100 – 200 с відбувається стабілізація коефіцієнта тертя, що підтверджує

завершення припрацювання на даній ступені. Час завершення припрацювання за коефіцієнтом тертя, рис. 5.9, збігається з часом завершення припрацювання за швидкістю зношування, рис. 5.8, по кожній із ступенів.

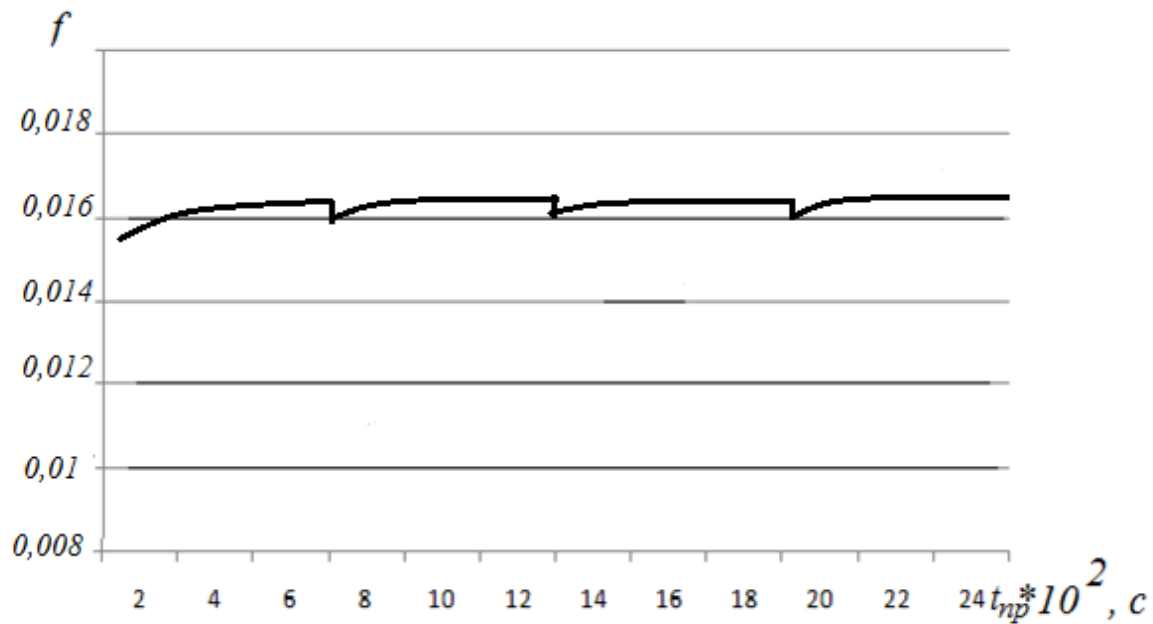


Рис. 5.9 – Залежність зміни коефіцієнта тертя при застосуванні ступінчастої програми обкатки шестеренного насоса НШ – 10

Результати моделювання величини зносу за час обкатки були перевірені експериментально на 10 насосах, які були обрані у випадковому порядку із загальної партії випуску. Вимірювання лінійного зносу виконували на вертикальному оптиметрі ИКВ, точність вимірювання 1 мкм.

Результати вимірювань показали, що середньостатистична величина зносу за обкатку становить 4 мкм. Отже, похибка моделювання становить 13 %.

Виконаємо моделювання обкатки шестеренного насоса за розробленою програмою припрацювання.

1. Перший режим: $P = 21$ МПа; $\omega = 30$ с⁻¹.
2. Другий режим: $P = 12,6$ МПа; $\omega = 50$ с⁻¹.

Результати моделювання представлені на рис. 5.10 та рис. 5.11. На підставі отриманої теоретичної залежності можна зробити висновок, що період обкатування становить $t_{пр} = 900$ с. При цьому знос за припрацювання становить

$U = 3,63$ мкм. Результати вимірювань величини мінімального зносу трибосистем 10 насосів, які були обкатані за розробленою програмою припрацювання, показали, що середньостатистична величина зносу складає 4 мкм. Похибка моделювання становить 9,25 %.

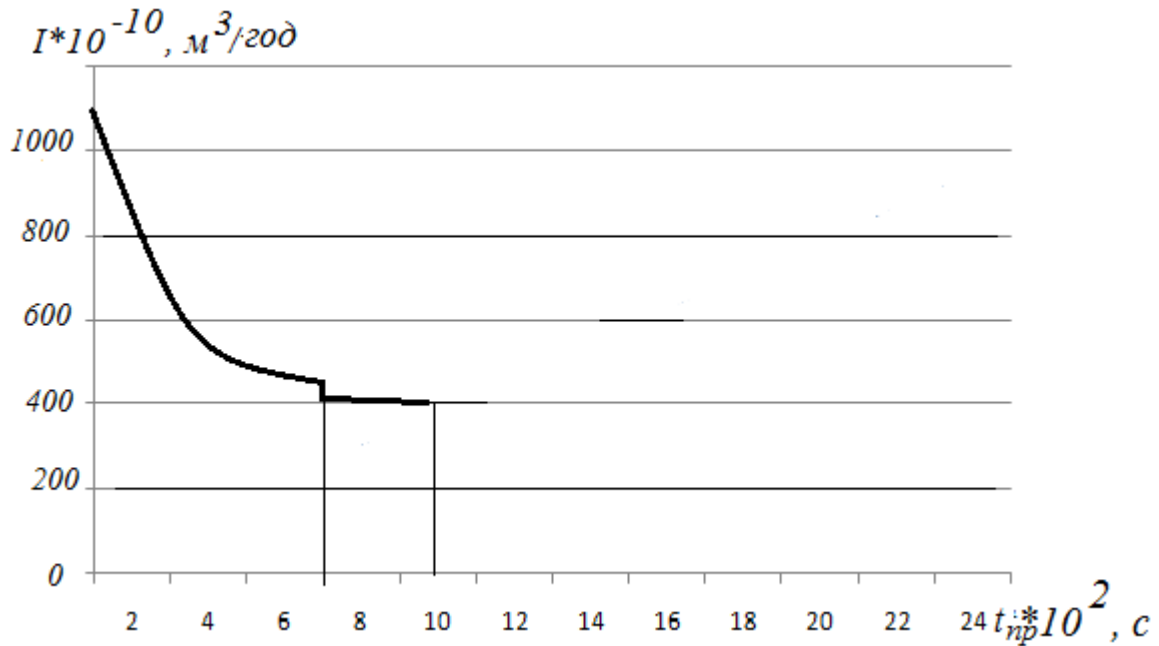


Рис. 5.10 – Залежність зміни швидкості зношування трибосистем НШ-10 при застосуванні розробленої програми припрацювання: режим 1 – режим 2

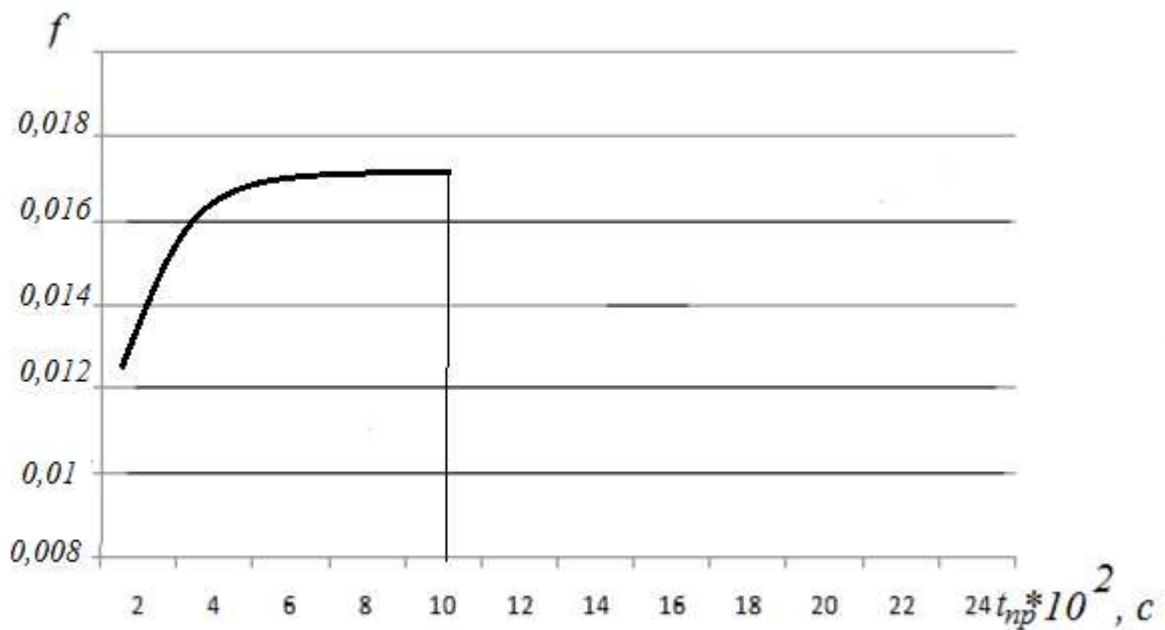


Рис. 5.11 – Залежність зміни коефіцієнта тертя трибосистем НШ-10 при застосуванні розробленої програми припрацювання: режим 1 – режим 2

На підставі виконаного математичного моделювання, а також проведених стендових випробувань шестеренних насосів НШ-10 можна зробити висновок, що раціональною програмою обкатки насосів після виготовлення є дворежимна програма.

1. Перший режим: $P = 21$ МПа; $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$; $t_{np} = 600$ с.

2. Другий режим: $P = 12,6$ МПа; $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$; $t_{np} = 300$ с.

Ефективність розробленої програми підтверджена експериментально і дозволяє стверджувати, що при однаковому лінійному зносі між площиною торкання букси і торцем зубчастого колеса, рівному 4,0 мкм, час обкатки зменшується з 2400 с до 900 с.

Застосування розробленої програми в порівнянні з типовою чотирьохступінчастою програмою, яка застосовується на заводі – виробнику, дозволяє скоротити час обкатки насосів на стенді в 2,66 раз, що принесе економічний ефект.

5.5 Оцінка економічного ефекту від впровадження програми обкатки насосів

Оцінка економічного ефекту від впровадження розробленої програми обкатки насосів НШ-10 складається в зменшенні часу обкатки насоса на стенді після виготовлення з 40 хвилин до 15 хвилин.

Згідно ГОСТ 23729-88, річний економічний ефект E_p від впровадження розробленої програми можна визначити за виразом:

$$E_p = \Pi_{в,б} \frac{K_{тв,н}}{K_{тв,б}} - \Pi_{в,н},$$

де $\Pi_{в,б}$, $\Pi_{в,н}$ – річні приведені витрати за базовою і новою програмами обкатки насосів, грн/рік;

$K_{тв,б}$, $K_{тв,н}$ – коефіцієнти технічного використання стендового обладнання для обкатки за базовою і новою програмами.

Річні приведені витрати визначають за формулою:

$$P_{\text{в}} = I + E * K,$$

де I – прямі витрати від використання стендового обладнання;

E – нормальний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, дорівнює 0,15;

K – капітальні вкладення (балансова вартість стенду), дорівнює 220000 грн.

Прямі експлуатаційні витрати визначають за формулою:

$$I = A + P_{np} + P_{mo} + B_{zn} + B_{el},$$

де A – витрати на реновацію, грн/рік;

P_{np} – витрати на поточний ремонт стенда, грн/рік;

P_{mo} – витрати на технічне обслуговування стенда, грн/рік;

B_{zn} – витрати на заробітну плату персоналу, грн/рік;

B_{el} – витрати на електроенергію, грн/рік.

Витрати на реновацію A , а також витрати на поточний ремонт P_{np} , технічне обслуговування P_{mo} приймемо рівними як для базової програми, так і для нової.

Різними будуть заробітна плата обслуговуючого персоналу і витрати електроенергії.

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу:

$$B_{zn} = N * G * PP * ЧО,$$

де N – кількість працюючих на стенді, $N = 4$ люд;

G – годинна ставка робітника, 200 грн/година;

PP – річна програма обкатки, 1200 насосів;

$ЧО$ – час обкатки: базова програма 0,66 години; нова програма 0,25 години:

$$B_{zn,б} = 4 \cdot 200 \cdot 1200 \cdot 0,66 = 633600 \text{ грн/рік};$$

$$B_{zn,н} = 4 \cdot 200 \cdot 1200 \cdot 0,25 = 240000 \text{ грн/рік}.$$

Витрати на електроенергію:

$$B_{el} = P_c * TE * PP * ЧО,$$

де P_c – експлуатаційна потужність стенду, 24 кВт·год;

TE – тариф на електроенергію, 2,6 грн/кВт·год.

Для базової програми обкатки:

$$B_{ел,б}=(24 \cdot 1200 \cdot 0,66) \cdot 2,6=49420,8 \text{ грн/рік.}$$

Для нової програми обкатки:

$$B_{ел,н}=(24 \cdot 1200 \cdot 0,25) \cdot 2,6=18720 \text{ грн/рік.}$$

Прямі експлуатаційні річні витрати на обкатку для базової та нової програми:

$$I_{б} = B_{зн,б} + B_{ел,б} = 633600 + 49420,8 = 683020,8 \text{ грн/рік;}$$

$$I_{н} = B_{зн,б} + B_{ел,б} = 240000 + 18720 = 258720 \text{ грн/рік.}$$

Річні приведені витрати за базовою і новою програмами обкатки насосів, грн.:

$$P_{бб} = I_{б} + E \cdot K = 683020,8 + 0,15 \cdot 220000 = 716020,8 \text{ грн/рік;}$$

$$P_{бн} = I_{н} + E \cdot K = 258720 + 0,15 \cdot 220000 = 291720 \text{ грн/рік.}$$

Річний економічний ефект, за умови, що коефіцієнт технічного використання стану за двома варіантами не змінився:

$$E_p = P_{бб} - P_{бн} = 716020,8 - 291720 = 424300,8 \text{ грн/рік.}$$

5.6 Висновки до п'ятого розділу

1. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблена 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 мікровиступів сформувати 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.

2. 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 %.

3. 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.

4. 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 і 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

ковання). 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 рішення 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 обґрунтовані й експериментально підтверджені 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 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 мікровиступів сформувати 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.

9. 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буше Н.А. Совместимость трущихся поверхностей / Н.А. Буше, В.В. Копытько. – М. : Наука, 1981. – 128 с.
2. Алексеев Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. I. Подповерхностные процессы / Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, №5. – С. 773-783.
3. Алексеев Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. II. Поверхностные процессы / Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, №6. – С. 965-974.
4. Алексеев Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. III. Микропроцессы механической приспособляемости / Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, №2. – С. 197-205.
5. Буше Н.А. Решенные и нерешенные задачи по совместимости трибосистем / Н.А. Буше // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 25-34.
6. Карасик И.И. Развитие критериев и методов экспериментальной оценки прирабатываемости материалов / И.И. Карасик // Вестник машиностроения. – 1984. – №11. – С. 16-19.
7. Карасик И.И. Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения / Автореф. дис. докт. техн. наук. – М. : Наука, 1983. – 36 с.
8. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении / Б.И. Костецкий // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, №2. – С. 201-213.
9. Бершадский Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем / Л.И. Бершадский. – К. : Знание, 1984. – 20 с.
10. Шевеля В.В. Реология вязкоупругого фрикционного контакта / В.В. Шевеля, А. Трытек // Проблемы трибологии. – 2010. – № 4. – С.6-16.
11. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.

12. Захаров С.М. Об оценке совместимости трибосистем по различным показателям и методам (к 100-летию со дня рождения Н.А. Буше) / С.М. Захаров, И.Г. Горячева // Вестник ВНИИЖТ, 2016, т.75, №5, с. 263-270.

13. Матвеевский Р.М. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки / Р.М. Матвеевский, И.А. Буяновский, О.В. Лазовская. -М.: Наука, 1978. -191 с.

14. Гарбар И.И. Фрагментация поверхностных слоев низкоуглеродистой стали и меди при усталостном и адгезионном изнашивании / И.И. Гарбар // Трение и износ. 1986. Т. 7. №6. С. 1043–1053.

15. Буше Н.А. Критерии и методы исследования совместимости кинематических пар трения и их использование при разработке новых смазочных материалов для червячных передач / Н.А. Буше [и др.] // Проблемы трения и изнашивания: сб. Киев: Техника, 1984. Вып.25. С. 67–76.

16. Федоров С.В. Разработка научных основ энергетического метода совместимости стационарно-нагруженных трибосистем / Автореф. дисс. д-ра техн.наук. -М., 1996. -36 с.

17. Буше Н.А. Механические процессы формирования вторичных структур подшипниковых сплавов / Н.А. Буше [и др.] // Трение и износ. 1981. Т.2. № 3. С. 212–220.

18. Буше Н.А. Контактное взаимодействие антифрикционных сплавов, содержащих мягкую фазу / Н.А. Буше, И.Г. Горячева, Р.А. Корнеев // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2001. Спецвыпуск. С. 35–39.

19. Буше Н.А. Влияние фазового состава антифрикционных алюминиевых сплавов на их самосмазывание при трении / Н.А. Буше, И.Г. Горячева, Ю.Ю. Маховская // Трение и износ. 2002. Т.23. №4. С. 286–295.

20. Курбаткин И.И. Влияние состава алюминиевых антифрикционных сплавов на процессы образования защитных пленок при их контактном взаимодействии / И.И. Курбаткин [и др.] // Трение и износ. 2006. Т. 27. №4. С. 355–360.

21. Маховская Ю.Ю. Моделирование выделения мягкой фазы на поверхность многокомпонентного алюминиевого сплава при трении / Ю.Ю. Маховская, И.Г. Горячева // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. №1. С. 15–23.
22. Juan Ruben Gomez-Solano. Non-equilibrium work distribution for interacting col-loidal particles under friction / Juan Ruben Gomez-Solano, Christoph July, Jakob Mehl, Clemens Bechinger // *New J. Phys.* 17. 2015. 045026. p. 1–13 (URL: <https://arxiv.org/abs/1501.02568>)
23. Bryant M.D. On the thermodynamics of degradation / M.D. Bryant, M.M. Khonsari, F.F. Ling // *Proc. R. Soc. A.* 2008. 464, 2001–2014 (URL: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/464/2096/2001>)
24. Amiri M. On the Thermodynamics of Friction and Wear / M. Amiri, M. Khonsari // *Review Entropy* 2010, 12, 1021–1049 (URL: <http://www.mdpi.com/1099-4300/12/5/1021>)
25. Banjac M. Friction and Wear Processes—Thermodynamic Approach / M. Banjac, A. Vencel, S. Otović // *Tribology in Industry* Vol. 36, No. 4. 2014. P. 341–347 (URL: <http://oaji.net/journal-archive-stats.html?number=664>)
26. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear, in: Q. J. Wang, Y.-W. Chung (Eds.) *Encyclopedia of Tribology*, Springer, New York, 2013, pp. 3622–3636 (https://www.researchgate.net/publication/258048885_Thermodynamics_of_Wear).
27. Bryant M.D. Entropy and dissipative processes of friction and wear, *FME / M.D. Bryant // Transactions*, 2009. Vol. 37, No. 2, pp. 55–60.
28. Nosonovsky M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization / M. Nosonovsky, V. Mortazavi // *Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact* CRC Press. 2013. 333 p. ((URL: <https://scholar.google.com/citations?user=sxvxBRIAAAAJ&hl=ru>)
29. Bershinsky, L.I. On selforganizing and concept of tribosystem self-organizing / L.I. Bershinsky // *Wear* 1992, V.13, p. 101–114.

30. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем / Л.И. Бершадский // - Киев: Об-во «Знание» УССР, 1990. -29 с.
31. Klamecki В.Е. Anentropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding /В.Е. Klamecki // Wear.V.96, №3, 1984, pp. 319–329.
32. Klamecki В.Е. Energy dissipation in sliding / В.Е. Klamecki // Wear» V.77, №3, 1982, pp. 115–128.
33. Klamecki В.Е. Wear—entropy production model /В.Е. Klamecki // Wear. V.58, №2, 1980, pp. 325...330.
34. Klamecki В.Е. A thermodynamic model of friction /В.Е. Klamecki // Wear. V.63, №1, 1980, pp. 113–120.
35. Гершман И.С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибо системах / И.С. Гершман, Н.А.Буше // Трение и износ. 1995. Т. 16. №1. С. 61–70.
36. Гершман И.С. Неустойчивость трибосистемы с токосяемом в процессе самоорганизации / И.С. Гершман, Н.А.Буше // Трение и износ. 1999. Т. 20. №6. С. 623–629.
37. Гершман И.С. Самоорганизация вторичных структур при трении / И.С. Гершман [и др.] // Трение и износ. 2003. Т. 24. №3. С. 329–334.
38. Gershman J.S. Thin films and selforganization during friction under the current collection conditions / J.S.Gershman, N.A. Bushe // Surface & Coating Technology. 186 (2004), 405–411 (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972/186>)
39. Gershmana I.S. Catalytic Effect during Friction /I.S. Gershmana, E.I. Gershman // Journal of Friction and Wear, 2011, Vol. 32, No. 6, pp. 431–436. Allerton Press.
40. Гершман И.С. Описание процессов трибосистем и разработка износостойких материалов с использованием неравновесной термодинамики и теории самоорганизации / И.С. Гершман, П.Ю. Перетягин, А.Е. Миронов, Е.И. Гершман // Вестник ВНИИЖТ, 2016, т.75, №5, с.271-277.

41. Псахье С.Г. Моделирование процессов трения на основе совмещенного дискретно-континуального подхода / С.Г. Псахье, А.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов, И.С. Коноваленко // Физ. мезомех. - 2005. - Т. 8. - № СпецВ. - С. 9-12.

42. Podra P. Finite element analysis wear simulation of conical spinning contacts considering surface topography / P. Podra, Soren Andersson // Wear. – 1999. – Vol. 224, Iss. 1. – P. 13-21.

43. Oqvist Mona. Numerical simulations of mild wear using updated geometry with different step size approaches / Mona Oqvist // Wear. – 2001. – Vol.249, Iss. 1-2. – P. 6-11.

44. Nam Ho Kim. Finite element analysis and experiments of metal/metal wear in oscillatory contacts / Nam Ho Kim, Dongki Won, Brian Holtkamp, Gregory R. Gessel, Paul Swanson, W. Gregory Sawyer // Wear. – 2005. – Vol.258, Iss. 11-12. – P. 1787-1793.

45. Benabdallah H. Finite element simulation of the wear of polyoxymethylene in pin-on-disc configuration / H. Benabdallah, D.Olender // Wear. – 2005.

46. Zhu Changming. A new boundary element/mathematical programming method for contact problems with friction / Changming Zhu // Communications in Numerical Methods in Engineering – 1995. – Vol.11, №8. – P. 683-690.

47. Li D.Y. A microscale dynamical model for wear simulation / D.Y. Li, Khaled Elalem, M.J. Anderon and S. Chiovelli // Wear. – 1999. – Vol.225-229, – P. 380-386.

48. Linck V. Modeling the consequences of local kinematics of the first body on friction and third body sources in wear / V. Linck, L. Baillet, Y. Berthier // Wear. – 2003. – Vol.225, Iss. 1-6. – P. 299-308.

49. Stromberg N. A method for structural dynamic contact problems with friction and wear / N. Stromberg // International journal for Numerical Methods in Engineering. – 2003. – Vol. 58, № 15. – P. 2371-2385.

50. Sfantos G.K. Wear simulation using an incremental sliding Boundary Element Method / G.K. Sfantos, M.H. Abliabadi // *Wear*. – 2006. – Vol.260, Iss. 9-10. – P. 1119-1128.

51. Sfantos G.K. A boundary element formulation for three-dimensional sliding wear simulation / G.K. Sfantos, M.H. Abliabadi // *Wear*. – 2006.

52. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов / Р.В. Сорокатый. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 242 с.

53. Федоров С.В. Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости / С.В.Федоров. - Калининград: КГТУ, 2003. -415 с.

54. Федоров С.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / С.В. Федоров. -Ташкент: Изд-во Фан, 1979. -186 с.

55. Фёдоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел. Ч. 1. Основы физической механики деформируемых тел (состояние проблемы) / под. ред. С.В. Фёдорова. -Калининград: КГТУ, 2012. -159 с.

56. Fleischer G. 40 Jahre Bewertung von Reibung und Verschleiss mit Hilfe der Energiedichte / G. Fleischer // *Tribologie und Schmierungstechnik*, 2004, 51 (3), p. 5–11.

57. Федоров С.В. Основы эргодинамики деформируемых тел и трибоэргодинамики / С.В.Федоров // Приложение к журналу. Справочник. Инженерный журнал. 2010. №8. 24 с.

58. Fedorov S.V. The Mechanical Quantum of Dissipative Friction Structures is the Elementary Tribonanostructure /S.V.Fedorov // *Proceedings of World Tribology Congress 2009 (6–11 September 2009)*: Japanese Society of Tribologists. Kyoto, Japan. p. 926.

59. Fedorov S.V. Energy Model of Sliding Friction Coefficient and Generalized Regularities of Tribosystems Evolution, in: *Transactions of the 19th International Colloquium Tribology «Tribology-Industrial and Automotive Lubrication»*, TAE, 21–23.01.2014, Esslingen, Germany.

60. Федоров С.В. К исследованию совместимости трущихся поверхностей / С.В. Федоров // Вестник ВНИИЖТ, 2016, т.75, №5, с.283-288.

61. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения / И.И. Карасик. – М.: Наука, 1978. - 136 с.

62. Буше Н.А. Оценка задиростойкости, износостойкости и сил трения с учетом факторов прирабатываемости триботехнических материалов / Н.А.Буше, И.И.Карасик, Н.М. Алексеев // Трение и износ, 1980, т.1, № 3, с.384-392.

63. Карасик И.И., Буше Н.А. Интерпретация диаграмм Герси--Штрибека с учетом прирабочных процессов. / И.И.Карасик, Н.А. Буше // В сб.: Методы оценки надежности технических систем по опытным данным. Труды ВНИИМАШ, вып.38, М., 1980.

64. Генкин В.А. Метод приработки материалов для узлов трения / В.А. Генкин, А.Л. Жарин, Е.И. Фишбейн, Н.А. Шипица, А.Л. Терехов // Трение и износ. - Гомель, 1989. -Т.10. -№3. -С. 530-534.

65. Сергеичев А В. Приработка сложных технических систем как метод повышения надёжности / А. В. Сергеичев, Н. Е. Денисова // Современные технологии в машиностроении : сб. материалов V Всерос. науч.-практ. Конф. Ч II. –Пенза: 2002.-С. 120-123.

66. Сергеичев А.В. Повышение работоспособности зубчатых передач за счёт совершенствования технологии приработки / А.В. Сергеичев, Н.Е. Денисова, Н.И. Волчихина // Актуальные проблемы науки и образования тр. Междунар. Юбил. Симп. В 2-х т. Т.2 / Под ред. М. А. Щербакова – Пенза: Информ -изд центр. - Пенз. Гос. ун-та, 2003. - С. 84-86.

67. Сергеичев А.В. Повышение эффекта приработки зубчатых колес после химического меднения в сочетании с закалкой / А.В. Сергеичев. Информационный инжиниринг организационного, технического и информационного сервиса, материалы Всерос. науч –практ. конф. – Кострома: КГУ им. Некрасова, 2005. - С. 56-61.

68. Сергеичев А.В. Приработка сложных технических систем с позиций надежности и изнашивания трения / А.В. Сергеичев, Н.Е. Денисова // Трение и износ. - Гомель, 2004. - Т.25. - №1. -С. 22-28.

69. Селезнев М. В. Влияние приработки поверхностей трения на оценку фрикционных свойств смазочных масел / М. В.Селезнев // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76), с.38-46.

70. Зелинский В.В. Феноменологические основы изофрикционной приработки опор скольжения машин. Часть 1 / В.В. Зелинский. – М: Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2009. -№ 6. – С. 117-121.

71. Зелинский В.В. Феноменологические основы изофрикционной приработки опор скольжения машин. Часть 2 / В.В. Зелинский // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2011. -№ 3. – С. 48-52.

72. Зелинский В.В. Теплообразование при приработке трибосистем с подшипниковыми сплавами / В.В. Зелинский // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2012, № 3, с. 59-63.

73. Волченков, А.В. Улучшенные режимы обкатки дизелей / А.В. Волченков, Н.А. Буше // Железнодорожный транспорт. – 1987. - №7. – С. 53 – 57.

74. Волченков А.В. К вопросу интерпретации приработки при трении / Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России / А.В.Волченков // VI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 2014 г.– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2014.– 695 с.: ил

75. Волченков А.В. Исследование антифрикционных материалов узлов трения на прирабатываемость / А.В. Волченков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id>.

76. Кіндрачук М.В. Вплив зовнішніх факторів на закономірності припрацювання антифрикційних систем / М.В. Кіндрачук, Ю.Л. Хлевна, Е.А. Кульгавий, О.Ш. Духота // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2013, №5/7 (65), С.15-19.

77. Киндрачук М.В. Процессы приработки в трибологических системах / М.В. Киндрачук, В.И. Дворук, Э.А. Кульгавый, Ю.Л. Хлевна // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С.25–32.

78. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія / В.В. Аулін. – Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. – 370 с.

79. Аулин В.В. Трибологические переходы при приработке поверхностей трения сопряженных деталей / В.В. Аулин, Т.Н. Замота, С.В. Лысенко, А.В. Гринькив, А.Е. Чернай // Проблемы трибологии (Problems of Tribology), 2017, № 4. С.87-94.

80. Алексеев В.П. Электрохимико-механическая макроприработка деталей / В.П. Алексеев // Монография. – Луганск: Элтон-2, 2011. – 204с.

81. Alan S. Brown. Flat, Cheap, and Under Control. IEEE Spectrum. – January 2005. – pp.40-45.

82. Economikos L. Integrated Electro-Chemical Mechanical Planarization (ECMP) for Future Generation Device Technology / L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart // IEEE, 2004. – pp.233-235.

83. Yuan-Long Chen. The technology combined electrochemical mechanical polishing / Yuan-Long Chen, Shu-Min Zhu, Shuo-Jen Lee and other // Journal of Materials Processing Technology 140, 2003. – pp.203-205.

84. Yung-Fu Wu. Effect of organic acids on copper chemical mechanical polishing/ Yung-Fu Wu, Tzu-Hsuan Tsai // Microelectronic Engineering, 2007. – pp.1-9.

85. Feng Gao. Tribo-electrochemical characterization of tantalum during electrochemical-mechanical polishing (ECMP): diss. PhD. Mechanical Engineering. - Texas A&M University. – 2010. – 145p.

86. Peter J. Blau. On the nature of running-in / Peter J. Blau // Tribology International 38, 2005. – pp.1007-1012.

87. Canhua Li. Electro– Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide / Canhua Li, Ishwara B. Bhat, Rongjun Wang, Joseph Seiler // Journal of Electronic Materials, Vol.33, №5, 2004. – pp.481-486.

88. Economikos L. Integrated Electro– Chemical Mechanical Planarization (ECMP) for Future Generation Device Technology / L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart // IEEE, 2004. – pp.233– 235.

89. Yair Ein–Eli. Review on copper chemical– mechanical polishing (CMP) and post– CMP cleaning in ultra large system integrated (ULSI)– An electrochemical perspective / Yair Ein–Eli, David Starosvetsky // Electrochimica Acta 52, 2007. – pp.1825-1838.

90. Shuo-Jen Lee. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology / Shuo-Jen Lee, Yu-Ming Lee, Ming-Feng Du // Journal of Materials Processing Technology 140, 2003. – pp.280-286.

91. Milind Kulkarni. Electropotential-stimulated wear of copper during chemical mechanical planarization / Milind Kulkarni, Dedy Ng, Melloy Baker and other // Wear 263, 2007. – pp.1470-1476.

92. Jui-Chin Chen. Chemical– mechanical polishing behavior of tantalum in slurries containing citric acid and alumina / Jui-Chin Chen, Wen-Ta Tsai // Surface & Coatings Technology 185, 2004. – pp.50-57.

93. Goonetilleke P.C. Electrochemical– mechanical planarization of copper: Effects of chemical additives on voltage controlled removal of surface layers in electrolytes / P.C. Goonetilleke, D. Roy // Materials Chemistry and Physics 94, 2005. – pp.388-400.

94. Samuel B. Darling and other. Chemical factors for chemicalmechanical and electrochemical-mechanical planarization of silver examined using potentiodynamic and impedance measurements / Samuel B. Emery, Jennifer L. Hubble, Maria A. // Materials Chemistry and Physics 89, 2005. – pp.345-353.

95. Alan S. Brown. Flat, Cheap, and Under Control. IEEE Spectrum. – January 2005. – pp.40– 45.

96. Taras Zamota. Improvement of roughness turning in surfaces of details // Материалы шестнадцатой научно-технической конференции / Taras Zamota, Alexander Kravchenko, Viktor Aulin // Транспорт, экология – устойчиво развитие, сборник доклады, изд.-во ТУ - Варна. – 2010.- С.607-614.

97. Dickde Roover. Model – Based Control for Chemical Mechanical Planarization / Dickde Roover, Abbas Emami– Naeini, JonL. Ebert// (CMP). AACC 2004. – pp.3922-3929.

98. D. Okumu Ouma. Characterization and Modeling of Oxide Chemical-Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concepts / D. Okumu Ouma, Duane S. Boning, James E. Chung and other // IEEE 2002. – pp.232-244.

99. Guanghui Fu. A Plasticity– Based Model of Material Removal in Chemical-Mechanical Polishing (CMP) / Guanghui Fu, Abhijit Chandra, Sumit Guha, Ghatu Subhash // IEEE 2001. – pp.406-417.

100. Furuchama S. A dynamic theory of piston-ring lubrication (3-rd report, Measurement of oilfilm thickness) / S.Furuchama, T.Sumi // Bulletin of ISME- Vol. № 4.- № 16.- 1961, pp.744-751.

101. Кузьменко А.Г. Дослідження зносоконтактної взаємодії змащених поверхонь тертя: Монографія. / А.Г. Кузьменко, О.В. Диха // – Хмельницький: ХНУ, 2005. – 183 с.

102. Дмитриченко Н.Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения: Монография / Н.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мацаканов. – Житомир: ЖИТИ, 2002. – 308 с.

103. Войтов В.А. Обоснование и выбор критериев моделирования скорости изнашивания на переходных режимах / В.А. Войтов, А.Г. Козырь // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 136: Системотехніка і технології лісового комплексу. Транспортні технології. – С. 247 – 256.

104. Войтов В.А. Методика оценки износостойкости и надежности трибосистем на неустановившихся режимах работы / В.А. Войтов, А.Г. Козырь // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 139: Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва. – С. 12 – 18.

105. Войтов В.А. Критерии моделирования силы трения на переходных режимах / В.А. Войтов, А.Г. Козырь // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград: КНТУ, 2013. – Вип. 26: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – С. 41 – 47.

106. Войтов В.А. Моделирование переходных процессов в трибосистемах. Часть 1. Критерии оценки переходных процессов / В. А. Войтов, А.Г. Козырь // Проблеми трибології. – 2013. – № 3. – С. 114 – 122.

107. Войтов В.А. Моделирование переходных процессов в трибосистемах. Часть 2. Методика моделирования переходных процессов / В.А. Войтов, А.Г. Козырь, И.И. Сысенко // Проблеми трибології. – 2013. – № 4. – С. 25 – 32.

108. Войтов В.А. Моделирование переходных процессов в трибосистемах машин и механизмов на этапе проектирования новой техники / В.А. Войтов, А.Г. Козырь // Перспективные технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве. – Минск: БГАТУ, 2013. – Ч. 2.–С. 113 – 118.

109. Franek F. Simulation of Tribosystems and Tribometry / F. Franek, G. Vorlaufer, W. Edelbauer, S. Bukovnik // Tribology in industry, 2007, Volume 29, No. 1&2, p.3-12.
110. Chaudhary V. Experiments with Parallelizing Tribology Simulations / V. Chaudhary, W. L. Hase, H. Jiang, L. Sun, D. Thaker // The Journal of Supercomputing, 2004, Volume 28, Issue 3, p.323 – 343
111. Грешников, В.А. Акустическая диагностика [Текст] / В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.
112. Баранов В.М. Акустические приборы ядерной энергетики [Текст] / В.М. Баранов, К.И. Молодцов. – М. : Атомиздат, 1980. – 144 с.
113. Щавелин В.С. Исследование акустического излучения, возникающего в зоне фрикционного контакта твердых тел / В.С. Щавелин, Г.А. Сарычев // Трение и износ. – 1983. – Т. 4, №5. – С. 808-816.
114. Щавелин, В.С. Акустический контроль узлов трения ЯЭУ [Текст] / В.С. Щавелин, Г.А. Сарычев. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
115. Свириденко, А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике [Текст] / А.И. Свириденко [и др.] ; под ред. В.А. Белого. – Минск : Наука и техника, 1987. – 280 с.
116. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин -М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.
117. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
118. Вайнберг, В.Е. Применение кинетической концепции разрушения для расчета интенсивности акустической эмиссии / В.Е. Вайнберг, А.Ш. Кантор, Р.Г. Лупашку // Дефектоскопия. – 1976. – №3. – С. 89
119. Гарбар, И.И. Некоторые закономерности формирования структуры металла при трении / И.И. Гарбар // Трение и износ. – 1981. – № 6. – С. 1076–1084.
120. Цеснек, Л.С. Механика и физика истирания поверхностей / Л.С. Цеснек. – М.: Наука, 1979. – 264 с.

121. Холодилов О.В. О вкладе термоактивационной составляющей акустической эмиссии при трении / О.В.Холодилов, Д.Ю.Белоногий // Неразрушающий контроль и диагностика. -2012. -№4. –С.14-19.

122. Деев А.А. Акустические колебания в фрикционном контакте как способность контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания / А.А.Деев // Вестник Рязанского государственного университета им. С.А.Есенина. – 2010. - №3. – С. 132-148.

123. Кузнецова О.С. Применение акустической эмиссии для исследования изнашивания хрупких материалов / О.С.Кузнецова, С.В.Сычев, Ю.А.Фадин, С.Г.Чулкин // Научно-технические ведомости. - СПбГПУ: Наука и обозрение 3-2. -2012. –С.174-177.

124. Кузнецова О.С. Особенности регистрации акустической эмиссии при экстремальных условиях трения хрупких тел [Текст] / О.С. Кузнецова, Ю.А. Фадин // XXXX Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV.— СПб: Изд-во Политехнического университета, 2011.— С. 89–90.

125. Stephens R.-W. B. Waveforms and frequency spectra of acoustic emission [Текст] / R.-W. B. Stephens, A.A. Pollock // J. Acoust. Soc. Amer., 1971.— Vol. 50., № 3.— P. 904–910.

126. Маленко П.И. Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания / П.И.Маленко // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Том 13. - №2. – С.164-171.

127. Фадин Ю.А. Динамика разрушения поверхности при сухом трении / Ю.А.Фадин // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т. 23. - Вып. 15. - С. 75–78.

128. Криштал М.М. Спектральные и энергетические характеристики акустической эмиссии при трении в условиях фрикционных автоколебаний / М.М.Криштал, Д.Л.Мерсон, А.В.Чугунов // Трение Износ Смазка. - 2007. - Т. 9. № 32. – С.37-42.

129. Dubravin A.M. Analysis of acoustic emission with a microtribometer of the reciprocating type / A.M. Dubravin, O.Yu. Komkov, N.K. Myshkin // *Friction and Wear*. - 2004. - Vol. 25. - № 4. - P. 363–367.
130. Колубаев Е.А. Анализ акустической эмиссии при трении скольжения высокомарганцевистой стали / Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, О.В. Сизова // *Письма в ЖТФ*. – 2010. – Том 36. – Вып. 16. – С. 55–61.
131. Семашко Н.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин и др. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
132. Фадин Ю.А. Применение акустической эмиссии для оценки массового износа / Ю.А. Фадин // *Трение и износ*. – 2008. – Т. 29. – № 1. – С. 29–32.
133. Ferrer C. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples / C. Ferrer, F. Salas, M. Pascal, J. Orozco // *Tribology International*. – 2010. – N 43. – P. 1–6.
134. Hase A. Acoustic emission in elementary processes of friction and wear / A. Hase, H. Mishina, M. Wada // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. – 2009. – V. 3. – N 4. – P. 333–344.
135. Колубаев Е.А. Особенности излучения акустического сигнала при сухом трении скольжения / Е.А. Колубаев, В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев // *Обработка металлов*. – 2013. - №1(58). – С. 69–74.
136. Рубцов В.Е. Особенности акустической эмиссии на разных стадиях изнашивания твердого покрытия при сухом трении / В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, М.И. Лобач, И.М. Гончаренко // *Известия вузов. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 5/2. – С. 234–238.
137. Колубаев Е.А. Особенности получения нанокристаллических покрытий системы Ti–Al–N и исследование их разрушения при трении скольжения с использованием метода акустической эмиссии / Е.А. Колубаев, М.И. Лобач, И.М. Гончаренко, Ю.А. Колубаева, О.В. Сизова // *Изв. вузов. Физика*. – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 246–250.

138. Рубцов В.Е. Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения / В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, В.Л. Попов // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – В. 4. – С. 79–86.
139. Рубцов В.Е. Пластическая деформация и квазипериодические колебания в трибологической системе / В.Е.Рубцов, А.В. Колубаев // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 74. – В. 11. – С. 63–69.
140. Рубцов В.Е. Неоднородность деформации и сдвиговая неустойчивость материала при трении / В.Е.Рубцов, С.Ю.Тарасов, А.В. Колубаев // Изв. вузов (Физика). – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 215–220.
141. Рубцов В.Е. Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения / В.Е.Рубцов, Е.А.Колубаев, В.Л.Попов // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – Вып. 4. – С. 79–86.
142. Шевченко С.А. Класифікація та обґрунтування вимог до акустико-емісійних ознак дефектів пар тертя механізмів / С.А.Шевченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім.П.Василенка. -2012. –Вип.121. – С.159-163.
143. Abdullah M. A comparative experimental study on the use of Acoustic Emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size / M .Abdullah, Al-Ghamd, D. Zhechkov, D. Mba// Mechanical System and Signal Processing, 2006. –№7, 1537–1571.
144. Mazal P.Applications of continuous sampling of AE signal for detection of fatigue damage / P.Mazal, V.Koula, F.Hort, F.Vlasic // NDT in Progress, 2009. –№4. –8 p.
145. Yanhui Feng.Discrete wavelet-based thresholding study on acoustic emission signals to detect bearing defect on a rotating machine/ Yanhui Feng, Suguna Thanagasundram, Fernando S. Schlindwein. // The Thirteen International Congress of Sound and Vibration. Vienna, Austria. 2-6 July, 2006. –8 p.
146. Бабак В.П. Непрерывный контроль процессов трения и изнашивания на основе использования метода акустической эмиссии /

В. П. Бабак, Войтов В. А., Стадниченко Н. Г. // Технологические системы. - 2004. - №2. - С. 42-46.

147. Філоненко С. Ф. Акустична емісія під час випробувань пар тертя з покриттям на зносостійкість / С. Ф. Філоненко, О. П. Космач // Наукоємні технології. - 2011. - № 3–4 (11–12). –С. 30–34.

148. Baran I. Application of acoustic emission in monitoring of failure in slide bearings / Ireneusz Baran, Marek Nowak, Wojciech Darski // J. Acoustic Emission, 25 (2007) . –P. 341–347.

149. Zykova L. Identification of Contact Fatigue Stages with Acoustic Emission Method / L. Zykova, P. Mazal, L. Pazdera // ECNDT. - 2006, - Poster 4. –P. 1–8.

150. Benabdallah H. S. Acoustic Emission and Its Relationship with Friction and Wear for Sliding Contact / H. S. Benabdallah, D. A. Aguilar // Tribology Transactions. - 2008. –Vol. 51. –P. 738–747.

151. Неразрушающий контроль. Справочник. Т. 7. Книга 2. Вибродиагностика / Под ред. В. В. Ключева. –М. : Машиностроение. - 2005. – 493 с.

152. Шевченко С.А. Диагностирование трибосистемы скольжения по интервалу корреляции огибающей сигналов акустической эмиссии / С.А.Шевченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім.П.Василенка. -2014. –Вип.147. – С.97-102.

153. Faris Elasha. Application of Acoustic Emission in Diagnostic of Bearing Faults within a Helicopter gearbox /Faris Elasha, Matthew Greaves, David Mba, Abdulmajid Addali //The Fourth International Conference on Through-life Engineering Services. Procedia CIRP, 2015, Vol.38, p. 30-36.

154. Seyed A. Analysis of Acoustic Emission Data for Bearings subject to Unbalance / Seyed A. Niknam, Tomcy Thomas, J. Wesley Hines, Rapinder Sawhney //International Journal of Prognostics and Health Management. 2013, Vol. 15, p. 1–10.

155. Badgujar M.P. Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Acoustic Emission Technique and Fuzzy Logic / M.P.Badgujar, A.V. Patil // International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology. 2014, Vol. 3, Issue 4, p.170–175.
156. Rao V.V.A Comparative Experimental Study on Identification of Defect Severity in Rolling Element Bearings using Acoustic Emission and Vibration Analysis / V.V. Rao, Ch. Ratnam // Tribology in Industry. 2015, Vol. 37, No. 2, p.176-185.
157. Zahari Taha. Acoustic Emission - Research and Applications. Chapter 4 – Acoustic Emission Application for Monitoring Bearing Defects / Zahari Taha, Indro Pranoto. // InTech. 2013, p.71–90. <http://dx.doi.org/10.5772/55434>
158. Kim Eric. Development of an online condition monitoring system for slow speed machinery / Eric Kim, Andy Tan, Mathew Joseph, Yang Bo-Suk// In: Proceedings of the 4th World Congress of Engineering Assets Management (WCEAM 2009), 28-30 September 2009, Athens, p.1-8.
159. Cristian Molina Vicuna. A method for extreme data reduction of Acoustic Emission (AE) data with application in machine failure diagnosis / Cristian Molina Vicuna, Christoph Howeler. // Surveillance 7, International Conference. 2013, p.1-11.
160. NienhausK. Development of Acoustic Emission (AE) based defect parameters for slow rotating roller bearings / K.Nienhaus, F.D. Boos., K.Garate, R.Baltes //Journal of Physics: Conference Series. 364. 2012. 012034. 1-10. doi:10.1088/1742-6596/364/1/012034
161. Yongyong He. Defect Diagnosis for Rolling Element Bearings Using Acoustic Emission / Yongyong He, Xinming Zhang, Michael I. Friswell // Journal of Vibration and Acoustics. 2009. Vol. 131 / 061012.
162. Шевченко С. А. Оптимизация параметров алгоритма акустико-эмиссионного диагностирования подшипников качения /С.А. Шевченко // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2016. Vol.18. No.7. p.19-26.

163. Войтов В.А. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин / В.А. Войтов, О.М. Яхно, Ф.Х. Аби-Сааб. – К.: КПИ, 1999. – 192 с.
164. Шевеля В.В. Закономерности изменения внутреннего трения в процессе работы трибосистемы и его учет при выборе совместных материалов / В.В. Шевеля, В.А. Войтов, М.Н. Суханов, Д.И. Исаков // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 4. – С 734 – 744. 164
165. Войтов В.А. Экспериментальная оценка степени влияния входящих в математические модели факторов на результаты моделирования процессов трения и изнашивания / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 156: Механізація сільськогосподарського виробництва. – С. 420 – 425.
166. Войтов В.А. Интегральный параметр оценки трибологических свойств смазочных материалов / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. Том 2. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 151. – С. 5 – 10.
167. Войтов В.А. Универсальная машина трения / В.А. Войтов, В.А.Баздеркин // Трение и износ. – 1993. – Т. 13, №3. – С. 501-506.
168. Зажигаев Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
169. Борисов М.В. Ускоренные испытания машин на износостойкость как основа повышения их качества // М.В. Борисов, И.А. Павлов, В.И.Постников. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 352 с.
170. Войтов В.А. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Проблеми трибології. – 2015. – № 1. – С. 49-57.
171. Войтов В.А. Моделирование процессов трения изнашивания в

трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Проблемы трибологии. – 2015. – № 2. – С. 36-45.

172. Евдокимов Ю.А. Планирование и анализ эксперимента при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тешин. – М. : Наука, 1980. – 228 с.

173. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов.– М.: Энергия, 1979. – 240 с.

174. Эйкхоф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния.– М.: Мир, 1975. – 684 с.

175. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. -352 с.

176. Гусев А. Н., Ишков С. А. Основы теории автоматического управления: Учебн. пособие Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2005. -164 с.

177. Страшинин Е. Э. Основы теории автоматического управления, Часть 1. Линейные непрерывные системы управления: Учебное пособие - Екатеринбург: УГТУ, 2000. 217 с.

178. Войтов В.А. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 3. Добротность трибосистемы / В.А. Войтов, М.Б. Захарченко // Проблемы трибологии. – 2015. – № 3. – С. 45-53.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Порівняння результатів моделювання і експерименту для різних конструкцій трибосистем.

Таблиця А1 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + сталь 40Х в мастильному середовищі $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{\text{екс}} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_b, \%$	f_m	$f_{\text{екс}}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	48,0	56,5	15,0	0,005	0,0055	9,0
200	41,0	47,0	12,7	0,017	0,0185	8,1
300	34,0	39,0	12,8	0,032	0,035	8,5
400	27,0	31,5	14,2	0,047	0,055	14,5
500	21,6	25,5	15,2	0,059	0,07	15,7
600	17,3	20,5	15,6	0,067	0,078	14,1
700	14,1	16,0	11,8	0,072	0,085	15,2
800	11,8	13,0	9,2	0,073	0,087	16,0
900	10,3	11,5	1,7	0,073	0,085	14,1
1000	9,34	9,0	3,7	0,071	0,08	11,2
1100	8,7	8,0	8,7	0,068	0,075	9,3
1200	8,31	7,5	10,8	0,065	0,073	10,9
1300	8,08	7,2	12,2	0,063	0,07	10,0
1400	7,96	7,0	13,7	0,062	0,067	7,4
1500	7,9	7,0	12,8	0,061	0,066	7,5
1600	7,88	7,0	12,5	0,06	0,055	9,0
1700	7,87	7,0	12,4	0,06	0,056	7,1
1800	7,88	7,0	12,5	0,061	0,057	7,0

Таблиця А2 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + СЧ в мастильному середовищі $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{\text{екс}} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{\text{екс}}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	34,6	40,5	14,5	0,005	0,0055	9,0
200	29,9	34,5	13,3	0,017	0,0188	9,5
300	24,7	28,5	13,3	0,031	0,035	11,4
400	20,0	23,2	13,7	0,045	0,053	15,0
500	16,2	18,5	12,4	0,056	0,066	15,1
600	13,3	15,3	13,0	0,063	0,073	13,6
700	11,2	13,0	13,8	0,067	0,075	10,6
800	9,85	10,8	8,7	0,068	0,077	11,6
900	8,9	8,0	11,7	0,067	0,075	10,6
1000	8,3	8,0	3,7	0,065	0,073	10,9
1100	7,92	7,5	5,6	0,062	0,065	4,6
1200	7,71	8,0	3,6	0,06	0,058	3,4
1300	7,59	8,0	5,1	0,058	0,055	5,4
1400	7,54	8,0	5,7	0,057	0,052	9,6
1500	7,51	8,0	6,1	0,056	0,05	12,0
1600	7,51	8,0	6,1	0,056	0,05	12,0
1700	7,52	8,0	6,0	0,057	0,053	7,5
1800	7,52	8,0	6,0	0,057	0,055	7,5

Таблиця А3 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4 в мастильному середовищі
 $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{экс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{экс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	24,1	27,7	12,9	0,0056	0,005	12,0
200	20,0	22,6	11,5	0,018	0,02	10,0
300	17,0	15,0	13,3	0,033	0,038	13,1
400	13,8	12,63	9,2	0,047	0,055	14,5
500	11,4	10,2	11,7	0,057	0,062	8,0
600	9,7	8,6	12,7	0,063	0,068	7,3
700	8,6	7,6	13,1	0,065	0,07	7,1
800	7,9	7,0	12,8	0,064	0,068	5,8
900	7,54	6,8	10,8	0,061	0,067	8,9
1000	7,35	6,7	9,7	0,058	0,055	5,4
1100	7,27	6,6	10,1	0,055	0,05	10,0
1200	7,26	6,7	8,3	0,053	0,049	8,1
1300	7,27	6,8	6,9	0,052	0,05	4,0
1400	7,3	6,6	10,6	0,051	0,054	5,5
1500	7,3	6,8	7,3	0,052	0,056	7,1

Таблиця А4 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³, $K_\phi = 6,06$ 1/м

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{\text{екс}} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{\text{екс}}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	59,2	68,0	12,9	0,012	0,013	7,6
200	38,0	44,0	13,6	0,037	0,041	9,7
300	21,3	24,5	13,06	0,058	0,065	10,7
400	11,5	12,8	10,1	0,068	0,08	15,0
500	7,14	8,0	10,7	0,068	0,08	15,0
600	5,8	6,0	13,3	0,062	0,07	11,4
700	5,9	5,5	7,2	0,056	0,055	1,8
800	6,5	6,0	8,3	0,052	0,05	4,0
900	6,97	6,5	7,2	0,051	0,048	6,2
1000	7,26	7,5	3,2	0,052	0,05	6,0
1100	7,41	8,0	7,3	0,054	0,05	8,0
1200	7,46	8,5	12,2	0,055	0,05	10,0
1300	7,45	8,5	12,3	0,056	0,05	12,0
1400	7,45	8,5	12,3	0,056	0,05	12,0

Таблиця А5 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³, $K_\phi = 12,5$ 1/м

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{\text{екс}} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_b, \%$	f_m	$f_{\text{екс}}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	24,1	27,7	12,9	0,0056	0,005	12,0
200	20,0	22,6	11,5	0,018	0,02	10,0
300	17,0	15,0	13,3	0,033	0,038	13,1
400	13,8	12,63	9,2	0,047	0,055	14,5
500	11,4	10,2	11,7	0,057	0,062	8,0
600	9,7	8,6	12,7	0,063	0,068	7,3
700	8,6	7,6	13,1	0,065	0,07	7,1
800	7,9	7,0	12,8	0,064	0,068	5,8
900	7,54	6,8	10,8	0,061	0,067	8,9
1000	7,35	6,7	9,7	0,058	0,055	5,4
1100	7,27	6,6	10,1	0,055	0,05	10,0
1200	7,26	6,7	8,3	0,053	0,049	8,1
1300	7,27	6,8	6,9	0,052	0,05	4,0
1400	7,3	6,6	10,6	0,051	0,054	5,5
1500	7,3	6,8	7,3	0,052	0,056	7,1

Таблиця А6 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³, $K_\phi = 23,6$ 1/м

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{\text{екс}} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{\text{екс}}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	12,7	14,5	12,4	0,003	0,0035	14,2
200	11,9	14,0	15,0	0,012	0,014	14,2
300	11,0	13,0	15,3	0,023	0,027	14,8
400	10,0	11,5	13,0	0,035	0,042	16,6
500	9,3	10,5	11,4	0,046	0,054	14,8
600	8,6	9,5	9,4	0,055	0,064	14,0
700	8,12	9,0	9,7	0,062	0,072	13,8
800	7,75	8,5	8,8	0,066	0,077	14,2
900	7,5	8,0	6,2	0,067	0,077	12,9
1000	7,35	7,8	5,7	0,066	0,076	13,1
1100	7,27	7,5	3,0	0,064	0,072	11,1
1200	7,23	7,5	3,7	0,061	0,065	6,1
1300	7,23	7,5	3,7	0,058	0,054	7,4
1400	7,24	7,8	7,1	0,055	0,05	10,0
1500	7,26	8,0	9,2	0,053	0,048	10,4
1600	7,3	8,2	10,9	0,051	0,048	10,8
1700	7,31	8,3	11,9	0,05	0,053	5,6
1800	7,33	8,3	11,6	0,05	0,054	7,4

Таблиця А7 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,4$ мкм

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{\text{екс}} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{\text{екс}}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	127	150,0	15,3	0,025	0,030	16,6
200	98,35	118,0	16,6	0,078	0,09	13,3
300	71,27	84,0	15,1	0,131	0,155	15,48
400	50,5	58,5	13,6	0,171	0,21	18,5
500	36,02	32,0	12,5	0,193	0,23	16,0
600	26,49	23,5	12,7	0,199	0,23	13,4
700	20,48	22,5	11,1	0,196	0,22	10,9
800	16,8	18,5	9,1	0,188	0,21	10,4
900	14,62	16,0	6,8	0,18	0,2	10,0
1000	13,34	14,5	8,0	0,174	0,19	8,4
1100	12,62	13,5	6,5	0,171	0,18	5,0
1200	12,2	13,0	6,1	0,170	0,165	3,0
1300	11,99	11,5	4,2	0,170	0,165	3,0
1400	11,87	11,5	3,2	0,171	0,160	6,8
1500	11,81	11,0	7,3	0,172	0,160	7,5
1600	11,78	10,5	12,1	0,173	0,160	8,1
1700	11,76	10,3	14,1	0,174	0,160	8,7
1800	11,76	10,3	14,1	0,174	0,160	8,7

Таблиця А8 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,2$ мкм

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{экс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{экс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	24,1	27,7	12,9	0,0056	0,005	12,0
200	20,0	22,6	11,5	0,018	0,02	10,0
300	17,0	15,0	13,3	0,033	0,038	13,1
400	13,8	12,63	9,2	0,047	0,055	14,5
500	11,4	10,2	11,7	0,057	0,062	8,0
600	9,7	8,6	12,7	0,063	0,068	7,3
700	8,6	7,6	13,1	0,065	0,07	7,1
800	7,9	7,0	12,8	0,064	0,068	5,8
900	7,54	6,8	10,8	0,061	0,067	8,9
1000	7,35	6,7	9,7	0,058	0,055	5,4
1100	7,27	6,6	10,1	0,055	0,05	10,0
1200	7,26	6,7	8,3	0,053	0,049	8,1
1300	7,27	6,8	6,9	0,052	0,05	4,0
1400	7,3	6,6	10,6	0,051	0,054	5,5
1500	7,3	6,8	7,3	0,052	0,056	7,1

Таблиця А9 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Шорсткість поверхонь тертя $Ra = 0,1$ мкм

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{экс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{экс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	9,25	10,5	11,9	0,001	0,0011	9,0
200	8,6	9,5	9,4	0,003	0,0033	9,0
300	7,94	9,0	11,7	0,006	0,0067	10,4
400	7,38	8,3	11,0	0,0085	0,0095	10,5
500	6,97	7,5	7,0	0,01	0,0115	13,0
600	6,67	7,0	4,7	0,011	0,0125	12,0
700	6,48	6,8	4,7	0,011	0,0125	12,0
800	6,36	6,6	3,6	0,011	0,0125	12,0
900	6,29	6,0	4,8	0,01	0,011	9,0
1000	6,25	5,8	7,7	0,01	0,01	0
1100	6,23	5,6	11,2	0,0097	0,009	7,7
1200	6,22	5,6	11,0	0,0094	0,009	4,4
1300	6,21	5,6	10,8	0,0092	0,009	2,2
1400	6,21	5,6	10,8	0,0092	0,009	2,2
1500	6,22	5,6	11,0	0,0092	0,009	2,2

Таблиця А10 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Навантаження $N = 600$ Н, швидкість ковзання $v_{скл} = 0,5$ м/с.

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{экс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{экс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	24,1	27,7	12,9	0,0056	0,005	12,0
200	20,0	22,6	11,5	0,018	0,02	10,0
300	17,0	15,0	13,3	0,033	0,038	13,1
400	13,8	12,63	9,2	0,047	0,055	14,5
500	11,4	10,2	11,7	0,057	0,062	8,0
600	9,7	8,6	12,7	0,063	0,068	7,3
700	8,6	7,6	13,1	0,065	0,07	7,1
800	7,9	7,0	12,8	0,064	0,068	5,8
900	7,54	6,8	10,8	0,061	0,067	8,9
1000	7,35	6,7	9,7	0,058	0,055	5,4
1100	7,27	6,6	10,1	0,055	0,05	10,0
1200	7,26	6,7	8,3	0,053	0,049	8,1
1300	7,27	6,8	6,9	0,052	0,05	4,0
1400	7,3	6,6	10,6	0,051	0,054	5,5
1500	7,3	6,8	7,3	0,052	0,056	7,1

Таблиця А11 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Навантаження $N = 1000$ Н, швидкість ковзання $v_{скл} = 0,5$ м/с.

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{экс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{экс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	26,22	30,5	14,0	0,004	0,0044	9,0
200	23,0	26,5	13,2	0,015	0,017	11,7
300	19,42	22,5	13,6	0,029	0,033	12,1
400	16,11	18,5	12,9	0,04	0,045	11,1
500	13,4	15,0	10,6	0,054	0,063	14,2
600	11,37	13,0	12,5	0,062	0,072	13,8
700	9,9	11,0	10,0	0,066	0,077	14,2
800	9,0	10,0	10,0	0,067	0,078	14,1
900	8,53	8,5	0,3	0,066	0,077	14,2
1000	8,26	8,0	0,32	0,063	0,073	13,6
1100	8,17	7,5	8,9	0,059	0,060	1,6
1200	8,17	7,5	8,9	0,056	0,055	1,8
1300	8,22	7,5	9,6	0,054	0,05	8,0
1400	8,28	7,7	7,5	0,052	0,048	8,3
1500	8,35	7,7	8,4	0,051	0,048	6,2
1600	8,41	7,7	9,2	0,051	0,048	6,2

Таблиця А12 – Порівняння результатів моделювання та експерименту для трибосистеми сталь 40Х + Бр.АЖ 9 - 4, $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Навантаження $N = 1400$ Н, швидкість ковзання $v_{скл} = 0,5$ м/с.

Час процесу припрацювання t, c	$I_m \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$	$I_{экс} \cdot 10^{-10},$ $m^3/год$ (середнє значення)	$e_f, \%$	f_m	$f_{экс}$ (середнє значення)	$e_f, \%$
100	29,0	33,8	14,2	0,0039	0,0045	13,3
200	25,9	30,0	13,6	0,013	0,015	13,3
300	22,32	26,0	14,1	0,026	0,03	13,3
400	18,83	21,0	10,3	0,04	0,045	11,1
500	15,83	17,5	9,5	0,051	0,06	15,0
600	13,46	15,0	10,2	0,06	0,069	13,0
700	11,73	10,5	11,7	0,066	0,077	14,2
800	10,55	9,5	11,0	0,069	0,08	13,7
900	9,82	9,3	5,5	0,069	0,08	13,7
1000	9,43	9,0	4,7	0,067	0,078	14,1
1100	9,26	8,8	5,2	0,064	0,074	13,5
1200	9,25	8,6	7,5	0,06	0,068	11,7
1300	9,31	8,6	8,2	0,057	0,052	9,6
1400	9,41	8,6	9,4	0,053	0,05	6,0
1500	9,41	8,8	6,9	0,051	0,05	2,0
1600	9,52	8,8	8,1	0,051	0,05	2,0
1700	9,62	8,9	8,0	0,052	0,05	4,0
1800	9,71	8,9	9,1	0,052	0,05	4,0

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях:

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., Бекіров 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:

10. 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.

11. 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 інші.]*. – Вінниця: ВНТУ, 2018. С.57.

12. Войтов А.В., Бекіров 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.

ДОДАТОК В

Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор Харківського національного
технічного університету сільськогосподарства ім. П. Василенка

О.В. Нанка

2020р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача Бекірова Аблятіфа Шевкетовича «Моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання» зі спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах (131 – Прикладна механіка) в освітній процес.

Комісія у складі: проректора з науково-педагогічної роботи, кандидата технічних наук, доцента Заїкі С.О. (голова комісії), декана факультету технологічних систем і логістики, кандидата технічних наук, доцента Кравцова А.Г., завідувача кафедри транспортних технологій і логістики, доктора технічних наук, професора Войтова В.А., склали цей акт про те, що окремі положення дисертаційного дослідження здобувача Бекірова А.Ш. на тему: «Моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання» впроваджені в курс лекційного та практичного матеріалу дисциплін: «Техніко-експлуатаційні параметри транспортних засобів та їх діагностика», «Енергозбереження та поновлювальні джерела енергії на транспорті», «Експлуатаційні властивості і екологічна безпека транспортних засобів».

Голова комісії:

к.т.н., доц.

Члени комісії:

к.т.н., доц.

д.т.н., проф.



С.О. Заїка



А.Г. Кравцов

В.А. Войтов

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
“ХАРКІВСЬКЕ АГРЕГАТНЕ
КОНСТРУКТОРСЬКЕ БЮРО”**



**STATE ENTERPRISE
“KHARKIV AGGREGATE
DESIGN BUREAU”**

вул. Сумська, 132, м. Харків, 61023, Україна
тел. (057) 707-02-71, факс (057) 707-02-73, 700-48-94,
www.khadb.kh.ua E-mail: khadb@i.ua

132, Sumska St., Kharkiv, 61023, Ukraine
phone +380-57-707-02-71, fax +38-057-707-02-73, +38-057-700-48-94,
www.khadb.kh.ua E-mail: khadb@i.ua

04.08.2020 № 225-8/703
На № _____ від _____

АКТ

про використання результатів наукових досліджень дисертаційної роботи Бекірова Аблятіфа Шевкетовича «Моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання» зі спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах (131 – Прикладна механіка)

Державне підприємство Харківське агрегатне конструкторське бюро склали даний акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Бекірова Аблятіфа Шевкетовича «Моделювання перехідних процесів в трибосистемах машин та обґрунтування ефективної програми їх припрацювання».

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень в роботі розроблена структура програми припрацювання трибосистем, яка складається з двох режимів. 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.

Експериментальна перевірка розробленої програми на різних конструкціях трибосистем дозволила встановити ефективність режимів припрацювання.

Головний конструктор – директор



В.А. Матусевич