

**Войтов В.А.,
Бекиров А.Ш.,
Войтов А.В.**

Харьковский национальный технический
университет с/х им. П. Василенко,
г. Харьков, Украина
E-mail: vavoitovva@gmail.com

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ПРИРАБАТЫВАЕМОСТИ ТРИБОСИСТЕМ

УДК 621.891

DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-18-22

На основании анализа дифференциальных уравнений переходных процессов в трибосистеме обоснован критерий оценки чувствительности трибосистем к изменению внешних воздействий в процессе приработки и критерий прирабатываемости. Показано, что чем меньше значение критерия чувствительности, тем более устойчива трибосистема к внешним возмущениям и имеет меньшее время приработки. Обоснованы пути снижения критерия чувствительности, для этого необходимо увеличивать трибологические свойства смазочной среды, снижать шероховатость поверхностей трения и уменьшать скорость скольжения во время приработки.

Обоснован критерий для оценки прирабатываемости трибосистем. Показано, что чем больше значение критерия прирабатываемости, тем меньше время приработки. Для этого необходимо уменьшать скорость скольжения и начальную шероховатость поверхностей трения при одновременном увеличении трибологических свойств смазочной среды.

Ключевые слова: трибосистема; моделирование; переходные процессы; приработка; чувствительность трибосистемы; прирабатываемость трибосистемы; время приработки.

Актуальность проблемы

Приработка трибосистем является завершающим технологическим этапом в процессе изготовления или ремонта машин и, одновременно, начальным этапом эксплуатации. В процессе приработки формируются несущие поверхностные слои трибосистем, обеспечивая в дальнейшем максимальный ресурс и минимальные потери на трение. В процессе приработки формируется оптимальная шероховатость сопряжённых поверхностей в трибосистеме, а также активно протекают физико-химические явления, такие как тепловые, диффузионные, деформационные, которые имеют место в зоне трения в присутствии смазочных сред и окружающей среды. Существует большое количество параметров и критериев оценки эффективности приработки, основными из которых являются: время переходного процесса; износ за приработку; скорость изнашивания и коэффициент трения на установившемся режиме; максимальная эксплуатационная нагрузка и температура. Однако, по мнению автора работы [1], критерии оценки эффективности и качества процесса приработки требуют научного обоснования.

Исходя из вышеизложенного, в данной статье будут рассмотрены вопросы обоснования и выбора критериев оценки чувствительности трибосистем к изменению внешних воздействий, а также способности трибосистем прирабатываться.

Анализ публикаций посвященных данной проблеме

Основными работами, в которых проведен системный анализ и комплексные исследования процессов приработки трибосистем, являются работы [1, 2]. Автором обоснован комплекс критериев прирабатываемости трибосистем, таких как предельно допустимый износ за приработку, стойкость к заеданию, фрикционная теплостойкость, несущая способность и долговечность по износу после завершения приработки. В последующих работах многими исследователями делается вывод о функциональной связи прирабатываемости трибосистем и совместимости материалов в трибосистеме. Первыми работами, в которых дано определение совместимости материалов в узлах трения, являются работы [3, 4]. В данных работах предлагается оценку совместимости материалов в узлах трения выполнять по следующим количественным показателям: минимальная вероятность задира; минимальная интенсивность изнашивания; максимальная усталостная прочность и максимальная эффективность преобразования энергии.

Авторами работы [5], которая посвящена обзору показателей (критериев) совместимости материалов в трибосистемах, делается вывод, что критериями совместимости являются: температурный критерий; реакция трибосистемы на изменение режима трения; интенсивность изнашивания; энергетические показатели.

Обобщающим документом, регламентирующим показатели приработки трибосистем, является стандарт [6]. Согласно данного стандарта приработку оценивают следующими показателями: износ за приработку; максимальная скорость изнашивания во время переходного процесса; установившаяся ско-

рость изнашивания после завершения переходного процесса; критическая нагрузка заедания; температура; коэффициент трения; мощность трения; фрикционная теплостойкость.

Подводя итог анализу работ, посвященных процессам приработки, можно сделать вывод, что новизною данного исследования является обоснование критериев, которые оценивают чувствительность трибосистемы к изменению внешних воздействий, а также способность прирабатываться.

Цель исследований

Обоснование и выбор критериев оценки чувствительности трибосистем к изменению внешних воздействий, а также их способности прирабатываться.

Методический подход в проведении исследований

В работе [7] разработана математическая модель динамики переходных процессов скорости изнашивания и коэффициента трения в трибосистемах. Получены уравнения динамики переходных процессов в виде дифференциальных уравнений из решений которых следует, что переходный процесс в трибосистеме описывается колебательными звеньями второго порядка. Установлено, что характер протекания переходного процесса после приложения к трибосистеме входного воздействия зависит от коэффициентов усиления K_1 и K_2 .

Согласно работы [7] физический смысл коэффициента усиления K_1 – это реакция трибосистемы на внешнее входное воздействие (нагрузку, скорость скольжения, трибологические свойства смазочной среды), т.е. чувствительность трибосистемы, безразмерная величина.

Под чувствительностью будем понимать способность трибосистемы реагировать на изменение внешних воздействий, изменяя при этом скорость изнашивания и коэффициент трения, а также количественную оценку этой способности.

Согласно полученным дифференциальным уравнениям в работе [7] коэффициент усиления K_1 представлен выражением:

$$K_1 = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{фнк}}{Q} = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_{np}}{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{фнк}$ – напряжение на фактических пятнах контакта, Па, определяется по формулам, представленным в работе [8];

Q – добротность трибосистемы, определяется по формулам, представленным в работе [9];

$\dot{\epsilon}_{np}$ – приведенная скорость деформации в подповерхностных слоях материалов трибосистемы, 1/с, определяется по формулам, представленным в работе [8];

K_ϕ – коэффициента формы трибосистемы, рассчитывается по формуле [8];

a_{np} , E_y – приведенный коэффициент температуропроводности, м²/с, трибологические свойства смазочной среды, Дж/м³, [8];

δ_n , δ_n – реологические свойства структуры материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, безразмерная величина, учитывает внутреннее трение структуры материала [8].

Чем меньше значения коэффициента усиления K_1 , тем менее чувствительна трибосистема к изменению внешних воздействий (нагрузка, скорость скольжения, смазочная среда) во время работы. И наоборот, большие значения коэффициента K_1 (чувствительная трибосистема), характерны для высокой скорости изнашивания, высоких значений коэффициентов трения и возникновения задиоров.

Согласно ДСТУ 2823-94, а также ГОСТ ИСО 4378-1-2001 под прирабатываемостью трибосистемы понимается процесс изменения шероховатости поверхностей трения и структуры материалов поверхностных слоев, которые приводят к снижению скорости изнашивания и коэффициента трения и их стабилизацию на определенном уровне. Время стабилизации параметров называют время приработки.

Согласно полученным дифференциальным уравнениям в работе [7] коэффициент усиления K_2 характеризует способность трибосистемы изменять шероховатость и структуру поверхностных слоев при изменении внешних условий и представлен выражением:

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

где $d_{фнк}$ – диаметр фактического пятна контакта, м, определяется по формулам, представленным в работе [8];

W_{mp}, W_n, W_{n_1} – скорость работы диссипации в трибосистеме, подвижном и неподвижном трибоэлементе, Дж/с, рассчитывается согласно формул, которые приведены в работе [8]. Коэффициент усиления K_2 – безразмерная величина.

Чем больше значения коэффициента усиления K_2 , тем лучше прирабатываемость трибосистемы.

Результаты моделирования

Результаты моделирования изменения коэффициента K_1 , выражение (1), от основных параметров, которые влияют на процесс приработки, представлены на рис. 1. Анализ полученных кривых позволяет утверждать, что на чувствительность трибосистемы к изменению внешних воздействий, в первую очередь, оказывает влияние шероховатость поверхностей трения, затем, в порядке уменьшения влияния – скорость скольжения, а затем смазочная среда. Нагрузка на трибосистему оказывает влияние в незначительной степени. При этом увеличение шероховатости поверхностей трения Ra и скорости скольжения $v_{скл}$ повышает чувствительность трибосистемы к внешним воздействиям, что будет приводить к забросам скорости изнашивания и коэффициента трения во время приработки, тем самым способствовать увеличению времени приработки.

Увеличение трибологических свойств смазочной среды E_y способствует снижению чувствительности, а следовательно, будет снижать забросы скорости изнашивания и коэффициента трения во время приработки.

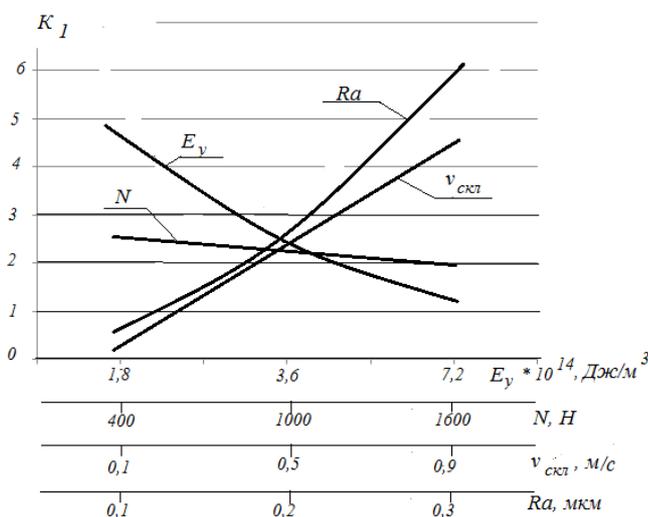


Рис. 1 – Зависимости изменения коэффициента K_1 от трибологических свойств смазочной среды, нагрузки, скорости скольжения и шероховатости поверхностей трения

Степень влияния чувствительности трибосистемы на время приработки представлена зависимостями на рис. 2. Как следует из представленных результатов для параметра скорости изнашивания существует оптимальное значение $K_1 = 3 \dots 4$. Дальнейшее увеличение K_1 будет вызывать увеличение времени приработки по параметру скорости изнашивания. При этом, увеличение K_1 снижает время приработки по параметру коэффициента трения.

Теоретические зависимости представленные на рис. 2 были проверены экспериментально. Для экспериментальных исследований были выбраны лабораторные трибосистемы для машины трения УМТ-1: сталь 40Х (подвижный трибоэлемент, внутреннее трение структуры материала $\delta_n = 2644$) + Бр. АЖ 9-4 (неподвижный трибоэлемент $\delta_n = 3494$) и трибосистема сталь 40Х + сталь 40Х. Коэффициент формы $K_\phi = 1,6 \dots 18,5$ 1/м. Смазочная среда – моторное масло М - 10Г₂к, трибологические свойства $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³. Температуропроводность стали $a_n = 1,27 \cdot 10^{-5}$ м²/с, температуропроводность бронзы $a_n = 2,1 \cdot 10^{-5}$ м²/с, шероховатость поверхностей трения, $Ra = 0,2$ мкм.

Рядом с теоретическими кривыми на рис. 2 нанесены экспериментальные точки и рассчитана относительная ошибка моделирования, которая составляет: $e_t = 7,9 \dots 9,0\%$.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что коэффициент усиления K_1 может выступать безразмерным критерием чувствительности трибосистемы к изменению внешних воздействий

во время приработки. Чем меньше значение K_1 , тем более устойчивая трибосистема к внешним возмущениям.

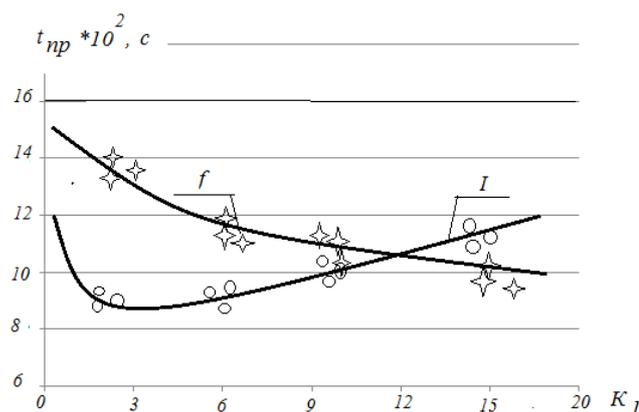


Рис. 2 – Зависимости изменения времени приработки по параметру скорости изнашивания и коэффициента трения от величины критерия чувствительности трибосистемы K_1

На основании зависимостей представленных на рис. 1, можно разработать мероприятия по снижению критерия чувствительности K_1 . Для этого необходимо увеличивать трибологические свойства смазочной среды, снижать шероховатость поверхностей трения и снижать скорость скольжения во время приработки. Параметр нагрузки N , как следует из рис. 1, не оказывает значительного влияния на изменение критерия чувствительности K_1 .

Результаты моделирования изменения коэффициента K_2 от основных параметров, которые влияют на процесс приработки, представлены на рис. 3. Анализ полученных зависимостей позволяет утверждать, что на прирабатываемость трибосистем при изменении внешних воздействий, в первую очередь, оказывает влияние скорость скольжения и начальная шероховатость поверхностей трения и в меньшей степени – смазочная среда. Нагрузка не оказывает влияния на изменение коэффициента K_2 .

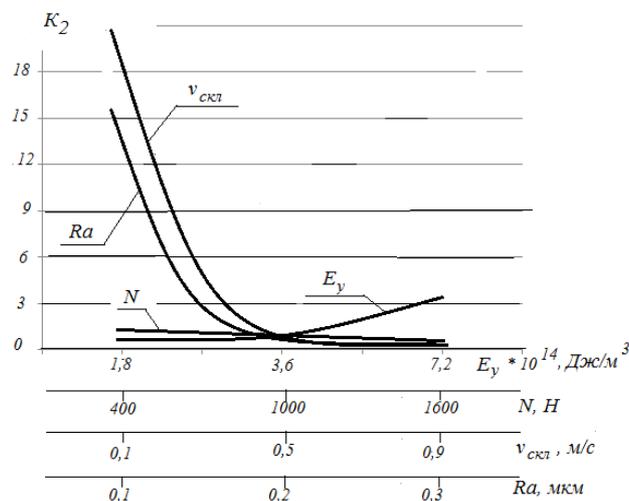


Рис. 3 – Зависимости изменения коэффициента K_2 от трибологических свойств смазочной среды, нагрузки, скорости скольжения и шероховатости поверхностей трения

Функциональная связь коэффициента K_2 и времени приработки трибосистем представлена на рис. 4. Рядом с теоретическими кривыми приведены экспериментальные точки для различных трибосистем, имеющих разные значения K_2 . Относительная ошибка моделирования $e_t = 8,4 \dots 9,5 \%$.

На основании полученных зависимостей можно сделать вывод, что коэффициент K_2 имеет минимальные значения для высших кинематических пар. При переходе к низшим кинематическим парам отмечается незначительный рост времени приработки при увеличении K_2 . Это можно объяснить увеличением размеров рабочих площадей трения у подвижного и неподвижного трибоэлементов. При этом, увеличение значения $K_2 > 250 \dots 300$ положительного эффекта не приносит.

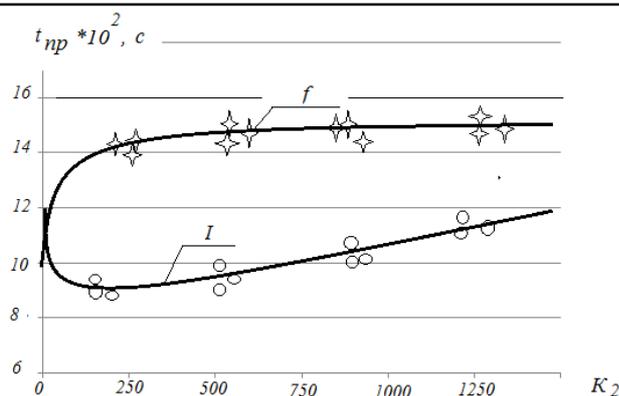


Рис. 4 – Зависимости изменения времени приработки по параметру скорости изнашивания и коэффициента трения от величины критерия прирабатываемости трибосистемы K_2

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что коэффициент K_2 , формула (2), может выступать в качестве безразмерного критерия прирабатываемости трибосистем. Для улучшения прирабатываемости трибосистем (увеличения коэффициента K_2) необходимо уменьшать скорость скольжения и начальную шероховатость поверхностей трения при одновременном увеличении трибологических свойств смазочной среды. Изменяя данные параметры можно управлять процессом приработки, обеспечивая $t_{np} \rightarrow \min$.

Выводы

1. Теоретическим путем, на основании анализа дифференциальных уравнений переходных процессов в трибосистеме, обоснован критерий оценки чувствительности трибосистем к изменению внешних воздействий в процессе приработки – K_1 . Установлена взаимосвязь между временем приработки и критерием чувствительности. Показано, что чем меньше значение критерия K_1 , тем более устойчива трибосистема к внешним возмущениям и имеет меньшее время приработки. Обоснованы пути снижения критерия чувствительности, для этого необходимо увеличивать трибологические свойства смазочной среды, снижать шероховатость поверхностей трения и уменьшать скорость скольжения во время приработки. Установлено, что параметр нагрузки не оказывает значительного влияния на изменение критерия чувствительности.

2. Обоснован критерий для оценки прирабатываемости трибосистемы K_2 . Установлено, что на прирабатываемость трибосистемы оказывает влияние скорость скольжения, начальная шероховатость поверхностей трения и смазочная среда. Показано, что для улучшения прирабатываемости трибосистем (увеличение критерия K_2), необходимо уменьшать скорость скольжения и начальную шероховатость поверхностей трения, при одновременном увеличении трибологических свойств смазочной среды.

Литература

1. Карасик И.И. Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения: Автореф. дисс...д-ра техн. наук, 1983. – 38 с.
2. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. – М.: Наука. – 1978. – 136 с.
3. Буше Н.А. Об исследованиях в области оценки совместимости трущихся пар // Проблемы трения и изнашивания: – К.: Техника, 1971. – Вып.1. – С. 17-21.
4. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 126 с.
5. Захаров С.М., Горячева И.Г. Об оценке совместимости трибосистем по различным показателям и методам (к 100-летию со дня рождения Н.А. Буше) / Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т. 75. – № 5. – С. 263-270.
6. ГОСТ Р 50740-95 Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения. Принят и введен в действие Госстандартом России от 13.02.95 № 50.
7. Войтов В.А., Бекиров А.Ш. Математическая модель переходных процессов в трибосистемах и результаты моделирования / Проблемы трибології. – 2018. – № 1. – С. 18-27.
8. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах // Проблемы трибології. – 2015. – № 1. – С. 49-57.
9. Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В. Критерий оценки добротности трибосистем и его связь с трибологическими характеристиками / Проблемы трибології. – 2018. – № 2. – С. 35-42.

Надійшла в редакцію 04.09.2018

Vojtov V.A., Biekirov A.Sh., Voitov A.V. **Justification of criteria for estimation of sensitivity and drilling of tribosystems.**

Based on the analysis of differential equations of transient processes in the tribosystem, the criterion for estimating the sensitivity of tribosystems to changes in external influences in the process of run-in and the criterion of run-in. It is shown that the lower the value of the sensitivity criterion, the more stable the tribosystem to external disturbances and has a shorter run-in time. The ways of reducing the sensitivity criterion are justified, for this it is necessary to increase the tribological properties of the lubricating medium, to reduce the roughness of the friction surfaces, and to reduce the slip speed during overtaking.

The criterion for estimating the workability of tribosystems is substantiated. It is shown that the greater the value of the criterion for the run-in, the shorter the running-in time. To do this, it is necessary to reduce the sliding speed and the initial roughness of the friction surfaces, while increasing the tribological properties of the lubricating medium.

Key words: tribosystem; modeling; transitional processes; running-in; sensitivity of the tribosystem; trimability of the tribosystem; run-in time.

References

1. Karasik I.I. Prirabatyvayemost', zakonomernosti i metody otsenki vliyaniya prirabotki i iznashivaniya na tribotekhnicheskiye kharakteristiki opor skol'zheniya: Avtoref. diss....d-ra tekhn. nauk, 1983. 38 s.
2. Karasik I.I. Prirabatyvayemost' materialov dlya podshipnikov skol'zheniya. M. Nauka, 1978. 136 s.
3. Bushe N.A. Ob issledovaniyakh v oblasti otsenki sovmestimosti trushchikhsya par. Problemy treniya i iznashivaniya. Kiyev. Tekhnika, 1971. Vyp.1. S. 17–21.
4. Bushe N.A., Kopyt'ko V.V. Sovmestimost' trushchikhsya poverkhnostey. M. Nauka, 1981. 126 s.
5. Zakharov S.M., Goryacheva I.G. Ob otsenke sovmestimosti tribosistem po razlichnym pokazatelyam i metodam (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya N.A.Bushe). Vestnik VNIIZHT, 2016, t.75, №5, s.263-270.
6. GOST R 50740-95 Tribotekhnicheskiye trebovaniya i pokazateli. Printsipy obespecheniya. Obshchiye polozheniya. Prinyat i vveden v deystviye Gosstandartom Rossii ot 13.02.95 № 50.
7. Vojtov V.A., Biekirov A.SH. Matematicheskaya model' perekhodnykh protsessov v tribosistemakh i rezul'taty modelirovaniya. Problems of tribology. 2018. № 1. S. 18-27.
8. Vojtov V.A., Zakharchenko M.B. Modelirovaniye protsessov treniya iznashivaniya v tribosistemakh v usloviyakh granichnoy smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipatsii v tribosistemakh. Problems of tribology. 2015. № 1. S. 49-57.
9. Vojtov V.A., Biekirov A.SH., Voitov A.V. Kriteriy otsenki dobrotnosti tribosistem i yego svyaz' s tribologicheskimi kharakteristikami. Problems of tribology. 2018. № 2. S. 35-42.