

$$F_3(\nu) = L_3 - L_n, \quad (1)$$

где  $L = R_b \nu$ ,  $\nu = \alpha + \psi_0$ ;  $\alpha = \arctg(L_n/R_b)$ ;  $L_n = \sqrt{R^2 - R_b^2}$ .

Здесь  $R_b$  – радиус вспомогательной основной окружности.

При выводе графика отклонения профиля

$$R \in (R_p \dots R_a),$$

где  $R_a$  – радиус окружности вершин,  $R_p$  – радиус нижних точек активного профиля.

При программировании станка решается обратная задача по заданным отклонениям профиля  $F_3$  и соответствующим углам развернутости  $\nu$  определяются радиусы точки профиля  $R$  и требуемая угловая координата  $\psi_0$ :

$$R = \sqrt{R_b^2 + (R_b * \nu - F_3)^2}, \quad \psi_0 = \alpha + \nu,$$

где  $\alpha$  определяется по формулам (1).

Координаты номинальной линии профиля, состоящей из комбинации прямой и эвольвенты, определяются вектор – функцией

$$\begin{aligned} R_\theta(\nu) &= R_b(1 - j\nu) \exp(j\nu), \text{ если } \nu \geq 0; \\ R_\theta(\nu) &= R_b \cos \nu, \text{ если } \nu < 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\nu$  – аргумент вектор-функции номинальной линии;  $j$  – мнимая единица.

В общем случае для расчета координат действительного профиля применяется вектор-функция

$$R(\nu) = R_0(\nu) \exp(j\psi), \quad (3)$$

которая каждому значению аргумента ставит в соответствие проекции точки  $M$  на оси координат, выраженные комплексной функцией  $R(\nu)$ .

При использовании описанного метода данные в станок вводятся в компьютер станка из файла через USB порт.

ФГУП "ММПП "Салют" предлагает также **партнерские программы**, сущность которых в том, что каждый партнер может разработать самостоятельную программу, использовать её для автоматизации шлифования неэвольвентных колес и самостоятельно продавать как коммерческий продукт, предлагая предприятиям, имеющим станки 5843Ф4 программы подготавливающие данные для того или иного исходного контура. В качестве примера на рисунке 3 приведен пример подготовки данных с помощью коммерческой программы AsGears, разработанной в ФГУП "ММПП "Салют".

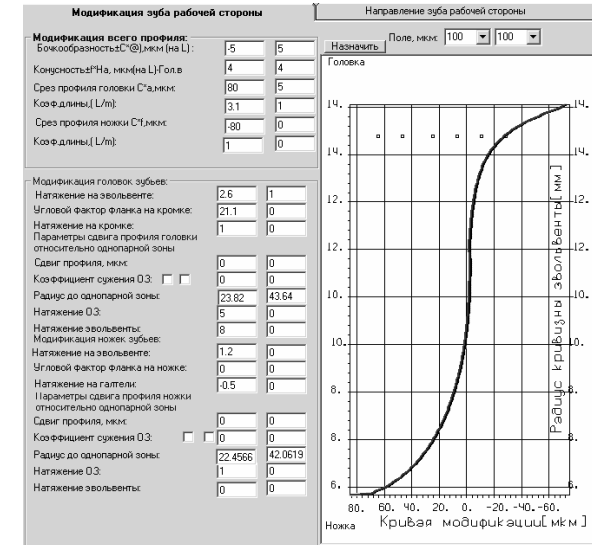


Рисунок 3 – Пример ввода данных в коммерческой программе AsGears

Поступила в редколлегию 10.04.09

УДК 620.178.16: 621.892

**А.В. ЗАХАРЧЕНКО**, ст. викл. каф. АТ ВМУРПоЛ "Україна", м. Київ

### КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ В ТРИБОСПОЛУЧЕННЯХ ЯК ГОЛОВНИЙ ПАРАМЕТР ПРОЦЕСУ

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по коэффициенту трения в трибосопряжении смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений вида трения, который может быть охарактеризован определённым критерием, поддающимся численной оценке и есть необходимым для технической диагностики трансмиссионных масел.

On the basis of tribology sources the analytical review of the ways to resolve the problem of choice according to the friction constant in the tribolinkings of oil material appropriate for the specific conditions of operation is suggested. The requirements for detection of threshold valuations of the friction kind that is characterised with a definite criterion that is quantitatively assessed and needed for technical diagnostics of gear oils.

Інтелектуальна економіка і матеріальне виробництво тісно пов'язані з наявністю високих (критичних) технологій, створення яких здійснюється інтелектуальною частиною суспільства. Оскільки на світовому ринку високих

технологій лідером є США, звернемося до прогнозів американських експертів на подальший розвиток науки та поглядів на її значення в суспільному і економічному розвитку. З урахуванням прогнозних документів, які протягом 2000-2004 рр. готувалися Пентагоном, Центральним розвідувальним управлінням, Державним департаментом і галузевими дослідницькими центрами, виконавці проекту дійшли висновку, що протягом наступного десятиріччя розвиток чотирьох технологічних галузей (біотехнології, технології матеріалознавства, нанотехнології та інформаційні технології) визначатиме глобальний процес розвитку людства [1]. Наприклад, "розумні" матеріали та нанотехнології підвищать функціональність і споживчі якості предметів побуту й інструментів виробництва також і за рахунок прогнозованого зменшення коефіцієнту тертя в трибосполученнях. Аналіз світового напрямку створення і використання високих технологій свідчить про чітку спрямованість науки і всього науково-технологічного потенціалу на кінцевий результат. Крім того, велике значення в розвинутих країнах надається прогнозу і експертним оцінкам, орієнтації і переорієнтації пріоритетів досліджень, а також процесу збільшення наукової, технічної та економічної інформації та зручного доступу до неї [2].

**Постановка проблеми.** Процес тертя при рідинному мащенні, з теоретичної й експериментальної точки зору, являє собою в загальному вигляді досить докладно вивчену проблему, але у сфері тертя при граничному мащенні (ГМ) залишається ще багато невирішених питань [3]. У разі застосування ГМ ефект мастильної дії (МД) залежить від сукупності специфічних властивостей мастильних матеріалів (ММ) і матеріалу пари тертя (ПТ) [4]. При цьому було розглянуто багато варіантів пояснення мастильної здатності (МЗ) оливи та її залежності від інших фізичних властивостей, зокрема об'ємної в'язкості [5]. Для визначення реологічних характеристик олив необхідним є проведення спільного аналізу як теоретичних, так і експериментальних досліджень стану ММ у зоні контакту [6-9].

Для здійснення способів аналізу ГМ трибосистеми слід окреслити головні параметри, що впливають на цей особливо складний процес. Деякі з них можна вивести з формули запропонованої Роувом [10, 11] для визначення інтенсивності адгезійного зношування гранично-змащеної системи. Характеризувати процес тертя й стану мастильного шару під час досліджень можуть різні показники, зокрема: величина коефіцієнта тертя ( $f$ ), величина зношування, об'ємна температура ММ  $T$ , товщина мастильного шару  $h$  й ін. [12]. У роботі [13] показана залежність технічного стану вузлів, агрегатів і механізмів від показників МЗ олив і можливості їхнього руйнування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** слід розпочати з того, що МЗ граничних плівок (ГП) оцінюють маслянистістю, тобто здатністю ММ забезпечувати зниження  $f$  [14]. Явище маслянистості вивчалось Б. В. Дерягіним,

який характеризував її як здатність ММ забезпечувати кращу МД в умовах, коли мастильний прошарок досить тонкий і його дія не визначається тільки в'язкістю. Нині є численні напрацювання щодо дії ММ, у тому числі тих, МД котрих обумовлюється не в'язкістю, а їхньою структурою й хімічним складом, тобто властивостями, які спочатку називалися маслянистістю змащень.

Під час тертя в ММ досягається мінімальний  $f$ , роль якого при цьому зводиться до зменшення площі безпосереднього контакту третьових поверхонь і, як наслідок, до зменшення адгезійної взаємодії між ними [15]. Мінімальне значення  $f$  досягається, коли деформації зрушення повністю локалізуються в модифікованому шарі, і зберігається в інтервалі температур, у якому забезпечується рівність швидкості його утворення й руйнування (зношування) [16]. Результати досліджень Боудена й Тейбора [17] показали, що добуток площі зрізу  $A_r$  й опору зрізу  $\tau_s$  має бути мінімальним, щоб  $f$  також був мінімальним. Це може бути забезпечено у разі, коли ММ відповідає конкретним умовам застосування [18]. Таким чином, той поріг, перехід через який приводить до зміни виду тертя, може бути охарактеризований певним критерієм, що піддається чисельній оцінці [19].

Область застосування терміна " $f$ " для характеристики тертя може бути обмежена межами контактних напруг  $\sigma \leq (0,25 \dots 0,3)\sigma_{02}$ , де  $\sigma_{02}$  – межа пластичності матеріалу. Вище цієї величини сила тертя  $F_T$  не змінюється або змінюється незначно до певного значення контактної тиску. Таке поведіння  $F_T$  у разі підвищення навантаження вказує на переважно адгезійний характер тертя в зазначених умовах, коли взаємний контакт між третьовими тілами досягає такого ступеня, що фактична площа контакту дорівнюється номінальній. Тим самим досягає межі й число можливих адгезійних зв'язків між тілами, на деформацію яких і витрачається робота тертя [20]. Величина зсувного опору в точці контакту менше за величину межі пластичності основного металу на порядок, що пояснюється властивостями третьових поверхонь [21, 22].

Міцність на зріз граничної плівки змінюється від дуже малих значень ( $\approx 2,5$  МПа) для стеарата кальцію ( $f=0,05$ ) до 1300 МПа для заліза. Висока міцність на зріз звичайно означає високе значення  $f$ , тому для плівок окису міді обміряні  $f \approx 1,8$  [23].

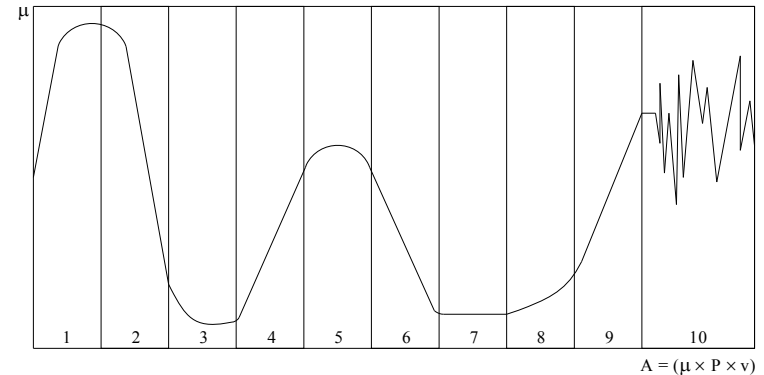
Зміни  $f$  спричиняють істотні зміни інтенсивності зношування матеріалу, тому що він визначає напружено-деформований стан і температуру матеріалу на точках контакту. Так, зниження  $f$  в 2–3 рази при введенні в зону тертя інертного ММ супроводжується зменшенням інтенсивності зношування поверхонь на два порядки й більше [16]. У разі застосування ефективних покриттів або змащень, коли й при максимальних навантаженнях не спостерігається яскраво виражена задирка,  $f$  не перевищує 0,28–0,30. Під час випробування необроблених металів, починаючи з навантаження заїдання,  $f$  має нестійкий характер і досягає значень 0,8–0,9 [24]. За інших умов випробувань заїдання може починатися й при інших значеннях  $f$  [19].

Втрати на тертя в трибосполученнях машин і механізмів також визначаються ММ. Порядок величин  $f$  при ГМ 0,01–0,1 [23]. При  $f \leq 0,1$  оливи, наприклад, вважаються гарним мастильним матеріалом, тому що забезпечують режим ГМ [25]. Авторами роботи [26] розглянуті механізм і дана оцінка  $f$  при ГМ в умовах підвищених навантажень, що припускають наявність мультишарів у зоні контакту, структурний стан яких визначає опір відносному ковзанню. Результати випробувань [27] показали, що у разі використання мастильної композиції (МК), що містить протизадирні присадки,  $f$  знижувався на 25% і становив 0,1. Зазначений ефект виявлено за високої температури, а за кімнатної вид ММ не впливає на тертя. У публікації [28] розглядаються різні підходи до визначення величини  $f$  і пропонується створення бази даних "Коефіцієнти тертя" як найбільш сучасного способу зберігання й переробки інформації.

При всьому різноманітті умов експерименту в переважній більшості досліджень залежність  $f$  від навантаження містить таку область, коли значення  $f$  приблизно постійні (стійкі) і мінімальні в порівнянні зі значеннями поза нею. Аналогічні області можуть бути виділені й для встановлення закономірностей зміни швидкості (інтенсивності) зношування. Реально, на різних ділянках ПТ  $f$  має різні значення, а середній ефект тертя являє собою комплексну характеристику, що відображає одночасно процеси зовнішнього тертя й пластичного деформування поверхневих шарів.

Найбільш раннє спостереження періодичності процесу тертя й зношування здійснене, очевидно, М. М. Хрущовим ще у 1938 р. Тоді періодичність зв'язувалася ним зі зміною ступеня наклепу поверхонь, що зношуються. Подальші пояснення періодичності процесів при терті змінювалися відповідно до еволюції уявлень про механізми тертя й зношування. Зараз частіше періодичність зміни показників тертя зв'язують із процесом утворення й руйнування вторинних структур (ВС) [29-31]. Однак сам цей процес часто надається в спрощеному вигляді. Сукупність усіх видів взаємодій мікроконтактів подано в роботі [32]. Для кожної трибосистеми у разі досягнення певного критичного навантаження відбувається вичерпання захисних механізмів і виникають пошкодження через тужавіння. Принципова залежність  $f$  від сполучення різних типів ВС наведена на рисунку 1 [33], де схема зміни  $f$  передбачає повний цикл перетворень ВС на взаємодіючих поверхнях тертя.

В основному  $f$  залежить не від в'язкості ММ, а від ряду факторів, що визначають його граничний стан, і факторів, пов'язаних з фізико-хімічним станом поверхні твердого тіла [34]. У роботі [35] показано, що навіть при постійному вхідному моменті зубчастої передачі вихідний момент на веденій шестірні міняється за рахунок тертя ковзання між зубами. Виведено формули, що визначають залежність відносних флуктуацій моменту від  $f$  і кількості зубів.



|            |    |        |         |         |         |             |
|------------|----|--------|---------|---------|---------|-------------|
| Поверхня 1 | IA | IA→IIA | IIA→PIB | PIB→IIB | IIB     | Спопльвання |
| Поверхня 2 | IA |        | IA→IIA  | IIA→PIB | PIB→IIB |             |

Рисунок 1 – Принципова схема зміни коефіцієнта тертя ( $\mu$ ) від питомої роботи тертя ( $A$ ) при різному сполученні типів вторинних структур на спряжених поверхнях тертя [33]

Трохи інша картина спостерігається в парах кочення. Оптимальні умови тертя реалізуються в тих випадках, коли обидві поверхні покриті пластичними, що легко перетікають плівками ВС I типу. Якщо на одній або обох ПТ формуються більш тверді, але крихкі плівки ВС II типу, то в умовах високих контактних навантажень відбувається їхнє руйнування (рисунок 2) [33], причому продукти зношування відіграють роль абразиву, збільшуючи тертя в парі.

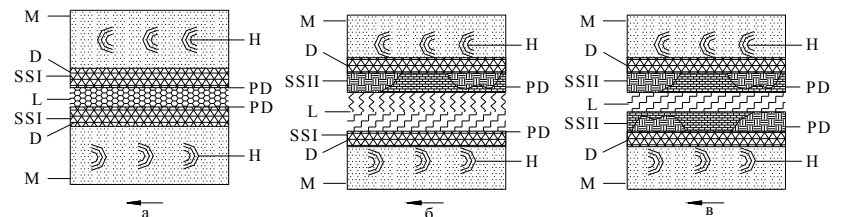


Рисунок 2 – Схема формування сил тертя при різному сполученні типів вторинних структур на спряжених поверхнях тертя: SSI – вторинні структури I типу; SSII – вторинні структури II типу; L – граничний мастильний шар; PD – шар продуктів деструкції мастильного матеріалу; D – шар пластично деформованого металу; H – поле пружних деформацій; M – основний метал [33]

Періодичність процесів при терті може бути представлена в рамках загального синергетичного підходу як ієрархія нестійкостей складних систем, що самоорганізуються [36]. У певному діапазоні умов тертя величина зношування за один період коливань є постійною. Це дало змогу розробити спосіб оцінки зношування деталей у процесі тертя за тривалістю періоду коливань по-

казників тертя. У разі підвищення навантаження вище критичного відбувається тужавіння з неперіодичними коливаннями показників, тобто "хаос", за термінологією Г. Хакена [36].

Міцність мастильного шару звичайно визначається за величиною навантаження, при якій різко зростає  $F_T$  або зношування зразків. За допомогою зазначеного методу здійснюються порівняльні випробування ММ і виявляються найбільш перспективні, особливо для умов з важкими режимами роботи, в присутності хімічно активних речовин у МК [37]. Якщо поверхнево-активні компоненти МК лише адсорбуються на металі, то присадки, що вводять в оливи, в основному вступають у хімічну взаємодію з третювими поверхнями, утворюючи більш міцні ГП [14]. Наприклад, еталонна олива при терті в режимі ГМ забезпечує менші  $f$ , ніж веретенна [38]. Протизадирний ефект, що досягається при модифікуванні ПТ, як правило, супроводжується зниженням  $F_T$  [17]. Авторами [39] на підставі моделі поширення поверхневих хвиль Стоунлі у вузлі тертя з урахуванням їхнього поглинання отримана залежність  $F_T$  від триботехнічних параметрів. Показано, що  $F_T$  зменшується зі збільшенням швидкості й майже лінійно залежить від контурного тиску й шорсткості, а поверхневий шар, в якому поширюються хвилі Стоунлі, виконує антифрикційну функцію.

Багаторічні роботи великої кількості дослідників показали, що чинником, який робить в умовах ГМ найбільший вплив на  $f$ , є температура в контактних спряжених тіл [40]. Для нелегованих нафтових олив вплив температури на  $f$  виявляється через зміну в'язкості ММ. Для МК з присадками такий безпосередній зв'язок може порушуватися і закономірності матимуть складніший характер [41]. Вплив в'язкості ММ на  $f$  залежить від середньої температури поверхонь робочих тіл, що вступають у контакт, від контактного тиску та швидкості ковзання [42]. Боуден і Тейбор [43] наводять цікавий принциповий графік ефективності різних типів ММ у вигляді залежності  $f$  від температури (рисунок 3).

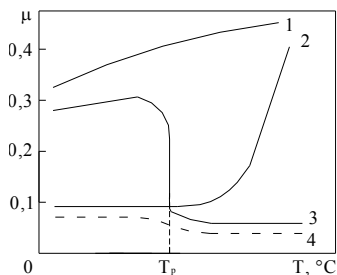


Рисунок 3 – Вплив температури на коефіцієнт тертя при машинній поверхні, що труться: 1 – вазелиновою неполярною оливою; 2 – жирною кислотою; 3 – протизадирною оливою; 4 – протизадирною оливою з добавкою жирної кислоти [43]

У.Б. Харді та І. Даблдей [44] вивели принципову залежність  $f$  від температури ММ (рисунок 4). Вона полягає в тому, що  $f$  зменшується по мірі того,

як температура ММ підвищується, наближаючись до температури плавлення. Цей процес необоротний і при зниженні температури хід залежності не повторюється.  $f$  ММ, що знаходиться в рідкому стані, зберігається в широкому діапазоні температур [18].

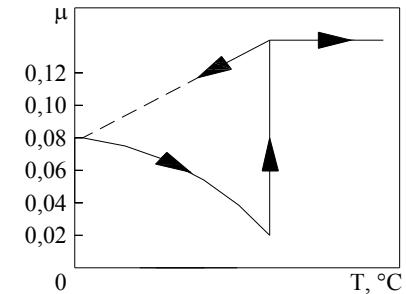


Рисунок 4 – Схема впливу температури мастильного матеріалу на коефіцієнт тертя [44]

При введенні між поверхнями тертя змащувального середовища  $f$ , починаючи з деякої досить значної величини, повільно знижується в часі. Харді, що відкрив і детально дослідив цей ефект, назвав час від моменту нанесення ММ на поверхні, що труться, до набуття стійкого значення  $f$  латентним періодом [45]. Який залежно від методу нанесення ММ, природи полярних молекул, властивостей поверхонь тертя, на які ММ наноситься, температури і стану середовища може змінюватися від кількох хвилин до декількох годин. Для неполярних молекул латентний період не спостерігається. В роботі [46] наведена часова динаміка  $\mu(t)$ , що показана на рисунку 5.

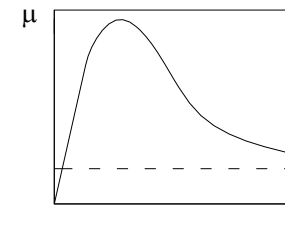


Рисунок 5 – Типова залежність коефіцієнта тертя від часу [46]

Характерна спрощена залежність  $f$  від температури при терті в режимі ГМ приведена на рисунку 6 [40]. Можливі перехідні процеси, що відбуваються при терті в умовах ГМ, розглянуті в [47-49]. На таких кривих може бути більше перегинів, що відображають певні зміни в стані поверхонь тертя. Так, автори роботи [50] отримали подібну залежність з чотирма перегинами.

Найбільш загальним визначенням  $F_T$  є, мабуть, сповна очевидна формула, що запропонована І.І. Карасиком [51]:  $F_T = (1/u) \times (\delta A / dt)$ , де  $(\delta A / dt)$  – потужність фрикційних втрат,  $u$  – швидкість відносного переміщення фрикційно-контактуючих тіл. Багаточисельні експериментальні та виробничі дані пока-

зують [17, 52-54], що при одному і тому ж нормальному навантаженні  $F_T$  може змінюватися в широких межах залежно від швидкості відносного переміщення, температури і середовища.

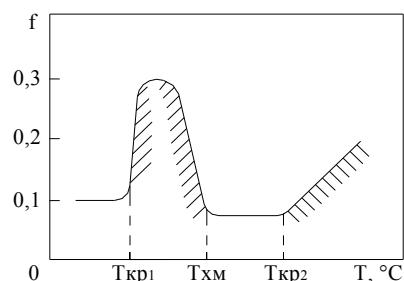


Рисунок 6 – Характерна залежність коефіцієнта тертя від температури при терті в режимі граничного мащення [40]

Великий вплив на характер перехідного тертя, на інтенсивність зносу і величину  $f$  надають хімічні процеси між матеріалом ПТ, оливою і навколишньою атмосферою [12]. Експериментально встановлено також, що  $f$  у зубчастих передачах значно залежить і від складу ММ, і від типу застосовуваних присадок – антифрикційних і протизадирних [55-59]. Більш високі  $f$  при мащенні оливами з сірковмісними присадками в порівнянні з мащенням оливами з хлорвмісними присадками пояснюються тим, що сірковмісні присадки за наявності вельми сильного протизадирного ефекту створюють на поверхнях тертя плівки сульфідів, що відрізняються досить високою твердістю, міцністю і опором на зрушення. Тоді як хлорвмісні присадки, маючи температурну межу працездатності багато нижче сірчанних, створюють на поверхнях тертя м'які плівки хлоридів заліза, що володіють пластинчастою структурою і, як наслідок, малим опором зрушенню [40, 60].

Проте, при заданому поєднанні матеріалів і оливи залежно від навантажувально-швидкісних режимів тертя можуть бути отримані як низькі (антифрикційність), так і високі значення  $f$  (фрикційність) [31]. Антифрикційність чи фрикційність є не властивістю, а станом пари тертя [33], який досягається при особливій будові поверхонь і поверхневих шарів спряжених деталей, що набувається ними в процесі тертя. В основному працями вітчизняних вчених було встановлено, що у визначених умовах трибохімічні перетворення приводять до виникнення граничних шарів, які забезпечують значне зниження тертя в спряженні, розширення меж його працездатності та зменшення зносу контактуючих поверхонь тертя [61].

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження можна стверджувати, що в умовах ГМ втрати на тертя залежать від специфічних властивостей оливи (МЗ), які не проявляються в більших об'ємах і в значній мірі залежать від їхньої структурно-групової сполуки. У цьому ж режимі має місце й великий

вплив антифрикційних присадок. І найголовніше – при найважчих режимах тертя величина  $f$  визначається хімічним складом протизадирних присадок, що створюють поверхневі плівки, в яких локалізується процес тертя.

Судячи з усього, подальше проникнення в механізм мастильної дії хімічно активних середовищ буде визначатися удосконаленням інструментальних методів дослідження тонких модифікованих шарів, що утворюються при терті. Найбільш перспективними є методи, які дозволяють здійснювати це безпосередньо під час трибологічного процесу (поки що такі методи у чистому вигляді відсутні). У всякому разі, скоріш за все метод "чорної скриньки" в таких дослідженнях себе майже вичерпав.

**Список літератури:** 1. Корсунський С.В. Трансфер технологій у США. – К.: УкрІНТЕІ, 2005. – 148с. 2. Пархоменко В.Д., Пархоменко О.В. Інформаційна аналітика у сфері науково-технічної діяльності: Монографія. – К.: УкрІНТЕІ, 2006. – 224с. 3. Билякович О.Н., Захарченко А.В., Корбут Ю.М. Современные трибологические представления о процессах в зоне контакта зубчатых зацеплений // Пр. Міжнар. конф. "Наука і молодь". – К.: НАУ, 2004. – С. 195-198. 4. Захарченко А.В. Современные трибологические представления о технических маслах как основном элементе смазываемого сопряжения // Вісн. Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Тем. вип. "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – № 30. – С. 192-199. 5. Матвеевский Р.М. Температурный метод оценки предельной смазочной способности машинных масел. – М.: АН СССР, 1956. – 144с. 6. Дроздов Ю.Н., Ромашкин О.Г., Ширококов В.В. Расчёт коэффициента трения тяжело нагруженных сопряжений при качении с проскальзыванием (со смазкой). – М., 1981. – 15с. (Препр. / ВНИИМаш. Госстандарт; МР19-81). 7. Захарченко А.В. Лабораторні методи досліджень мастильних властивостей трансмісійних оливи // Науково-технічна інформація. – 2005. – № 1. – С. 51-54. 8. Захарченко А.В. Лабораторное оборудование для исследования смазочных свойств трансмиссионных масел // Пр. Міжнар. конф. "Наука і молодь". – К.: НАУ, 2005. – С. 120-123. 9. Захарченко А.В. Діагностичний комплекс для досліджень мастильних властивостей трансмісійних оливи // Науково-технічна інформація. – 2005. – № 2. – С. 48-51. 10. Rowe C.N. Some aspects of the heat of adsorption in the function of a boundary lubricant // ASLE Trans. – 1966. – № 9. – P. 100. 11. Rowe C.N. A relation between adhesive wear and heat of adsorption for the vapor lubrication of graphite // ASLE Trans. – 1967. – № 10. – P. 10. 12. Райко М.В. Смазка зубчатых передач. – К.: Техніка, 1970. – 196с. 13. Глухоманюк Г.Г. Зависимость технического состояния узлов и агрегатов механизмов от показателя "смазочная способность масел" // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 5. – С. 28 – 31. 14. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. – 2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1985. – 312с. 15. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А.В. Белого, Н.К. Мышкина; Под ред. А.И. Свириденко. – М.: Машиностроение, 1986. – 360с. 16. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374с. 17. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел / Пер. с англ. Н.М. Михина, А.А. Силина; Под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 544с. 18. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания / Пер. с нем. О.Н. Озёрского, В.Н. Пальянова; Под ред. М.Н. Добычина. – М.: Машиностроение, 1984. – 264с. 19. Виноградов Ю.М. Трение и износ модифицированных металлов. – М.: Наука, 1972. – 152с. 20. Гайворонский А.Т., Гайворонская М.В., Проконьев Г.А. О необходимости учёта изменения баротермических свойств смазочных материалов при больших нагрузках // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 2. – С. 213-218. 21. Гайворонский А.Т., Растихин А.В., Карева А.А. Влияние толщины подсмазочного медного покрытия на напряжение сдвига пары трения сталь – твёрдый сплав при больших контактных нагрузках // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 5. – С. 706-707. 22. Растихин А.В., Гайворонский А.Т., Гайворонский А.А. Напряжение сдвига в контактной паре при нагрузках выше предела текучести одного из материалов для различных смазочных материалов // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 1. – С. 122-123. 23. Мур Д. Основы и применения трибоники / Пер. с англ. С. А. Харламова; Под ред. И.В. Крагельского. – М.: Мир, 1978. – 488с. 24. Виноградов Ю.М. Влияние сульфидов на трение и износ металлов // Тр. III Всесоюз. конф. по трению и износу. – М.: АН СССР, 1961. – С. 149-157. 25. Смазочные материалы:

Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний / *Р.М. Матвеевский, В.Л. Лаихи, И.А. Буяновский* и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224с. **26.** *Тихомиров В.П., Швыряев М.В.* Определение коэффициента трения при граничной смазке // Динамика, прочность и надёжность транспортных машин: Сб. науч. тр. Брянск. гос. техн. ун-та. – Брянск: БГТУ, 1999. – С. 148-154. **27.** *Haizuka Shoji, Itoh Kenichi, Nawate Humikazu, Naruse Chotaro.* Nihon kikai gakkai ronbunshu // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. – 2000. – Vol. 66, № 642. – P. 286-293. (Исследование потерь на трение в цилиндрических прямозубых зубчатых передачах.) **28.** *Заманова В.А., Костомарова Е.А., Юрьева А.В.* База данных "Коэффициенты трения" // Тр. СНТК Новомоск. ин-та Рос. хим.-технол. ун-та. – Новомосковск: НИ РХТУ, 2000. – С. 14-16. **29.** *Кривенко И.И.* Определение характеристик изнашивания пар трения методом электрической проводимости: Дис. канд. техн. наук: 05.02.04. – К., 1983. – 212с. **30.** *Крупкин П.Л., Циванюк К.В.* Исследование периодических колебаний коэффициента трения // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 2. – С. 277-284. **31.** *Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И. Г.Носовский, А.К. Караулов* и др.; Под общ. ред. д-ра техн. наук *Б.И. Костецкого*. – К.: Техника, 1976. – 296с. **32.** *Кривенко И.И.* Механизм граничной смазки и периодические колебания показателей трения // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 3. – С. 410-416. **33.** *Караулов А.К., Худолый Н.Н.* Автомобильные масла. Моторные и трансмиссионные. Ассортимент и применение. – К.: Радуга, 2000. – 436с. **34.** *Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И.* Механохимические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 172с. **35.** *Xu Fu-ren.* Jixie sheji yu zhizao // Mach. Des. and Manuf. – 2000. – № 5. – P. 37-39. (Соотношения между флуктуацией выходного момента зубчатой передачи, коэффициентом трения между зубьями и числом зубьев.) **36.** *Хаген Г.* Синергетика: Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 462с. **37.** *Матвеевский Р.М.* Температурная стойкость граничных смазочных слоёв и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – 228с. **38.** *Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В.* Исследования температурных пределов защитных свойств смазочных слоёв при трении // Износостойкость. – М.: Наука, 1975. – С. 51-75. **39.** *Березняков А.И.* О взаимосвязи триботехнических с особенностями распространения поверхностных волн Стоунли в поглощающей среде // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 3. – С. 264-268. **40.** *Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В.* Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. – М.: Наука, 1978. – 192с. **41.** Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / *Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков*. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с. **42.** Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. *И.В. Крагельского, В.В. Алицина*. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400с. **43.** *Bowden F.P., Tabor D.* The friction and lubrication of solids. – London, Oxford: Clarendon Press, 1950. **44.** *Hardy W., Doubleday I.* Boundary Lubrication. The Temperature Coefficient. Proc. Roy. Soc. – 1922. – Vol. 101, № 1. **45.** *Фукс И.Г., Буяновский И.А.* Введение в трибологию. – М.: Нефть и газ, 1995. – 278с. **46.** *Бершадский Л.И., Варнавин С.В., Назорных С.Н., Сарафанов Г.Ф.* О структурно-динамических аспектах трения металлов // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 1. – С. 40-48. **47.** *Матвеевский Р.М., Лозовой Ю.А., Шепелева Е.С.* Эффективность противоизносных присадок и температура их взаимодействия с поверхностью трения // Химия и технология топлив и масел. – 1970. – № 8. – С. 39-46. **48.** *Sethuramiah A., Ocabe H., Sacurai T.* Critical temperature in EP lubrication // Wear. – 1974. – Vol. 26, № 2. – P. 187-206. **49.** *Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лаихи В.Л., Виттер А.Б.* Оценка энергии активации процесса химического модифицирования поверхностей трения в условиях граничной смазки // Химия и технология топлив и масел. – 1976. – № 2. – С. 50-52. **50.** *Vaile M.W., Cameron A.* The influence of temperature and metal pairs on the scuffing of a commercial oil // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1973. – Vol. 187, № 67. – P. 757-761. **51.** Физические величины. Справочник. – М.: Энергоиздат, 1991. – 478с. **52.** *Боуден Ф.П., Тейбор Д.* Трение и смазка. – М.: Mashgiz, 1960. – 480с. **53.** *Кониссаров Д.В.* Трение и износ металлов. – М.: Mashgiz, 1947. – 246с. **54.** *Кузнецов В.Д.* Физика твёрдого тела. Т. 4. – Томск: Полиграфиздат, 1947. – 316с. **55.** *Виноградова И.Э.* Противоизносные присадки к маслам. – М.: Химия, 1972. – 164с. **56.** *Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В.* Оптимизация концентрации химически активных веществ в трансмиссионных маслах // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2000. – № 2. – С. 35-41. **57.** *Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В.* Оптимизация концентрации пакета присадок при легировании трансмиссионных масел // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Тем. вип. "Технології в машинобудуванні". – Харків: ХДПУ, 2000. – № 109. – С. 208-216. **58.** *Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В.* Сравнительная оценка эффективности смазочного действия различных трансмиссионных масел //

Авиационно-космическая техника и технология. Тем. вып. "Тепловые двигатели и энергоустановки". – Харьков: ГАУ "ХАИ", 2000. – № 19. – С. 473-477. **59.** *Запорожец В.В., Билякович О.М., Захарченко А.В.* Підвищення мастильної дії трансмісійних олив в умовах граничного режиму тертя // Пр. Міжнар. конф. "Авіа-2001". – Київ: НАУ, 2001. – Т. 1. – С. 14.110-14.113. **60.** *Розенберг Ю.А.* Влияние смазочных масел на надёжность и долговечность машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 312с. **61.** Современная трибология: Итоги и перспективы // Отв. ред. *К.В. Фролов*. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480с.

Поступила в редколлегию 28.04.09

УДК 531.539.3.62.752(031)

**Е.М. ИВАНОВ**, к.т.н., доц. каф. инженерной графики ХНАДУ "ХАДИ"

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Пропонується структурно-аналітичний метод який базується на принципах теорії автоматичного керування відносно до лінійних коливальних системам (КС) як консервативних, так і дисипативних з будь-яким числом ступенів вільності.

Structural-analysis method based on the principles of the theory of automated control relative to linear oscillatory systems (KC) both conservative and dissipative with any number of degrees of freedom has been offered.

Среди методов определения резонансных частот колебательных систем (КС) [2, 4] в литературе не был изложен предлагаемый структурно-аналитический метод, базирующийся на принципах теории автоматического управления с использованием в описании отдельных звеньев преобразования Фурье [1]. Предлагаемый метод будет изложен применительно к линейным КС с любым числом степеней свободы ( $n$ ) как к консервативным, так и дисипативным. В существующей литературе авторы ограничиваются определением резонансных частот консервативными КС, хотя в реальности наиболее часто встречаются диссипативные КС. Рассмотрение данного метода будем осуществлять последовательно от простой КС к более сложной. Наиболее простой КС является консервативная КС с одной степенью свободы. Ее дифференциальное уравнение следующее

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + cx(t) = F(t), \quad (1)$$

где  $m$  – масса;  $c$  – коэффициент жесткости (упругости);  $F(t)$  – внешнее воздействие;  $x(t)$  – перемещение;  $t$  – время.

Используя оператор Лапласа ( $p = d/dt$ ) [1], уравнение (1) принимает вид