

Самостійна робота за темою 14

Тема: Види зношування і пошкоджуваності поверхонь тертя

(Самостійно опрацювати матеріал за темою 14 згідно плану)

14.1. Моделювання процесів тертя і зношування. Фізичне моделювання.

14.2. Математичне моделювання. Імітаційне і аналогове моделювання.

14.1. Моделювання процесів тертя і зношування. Фізичне моделювання.

Сучасний етап розвитку техніки характеризується значним зростанням термінів служби і підвищення рівнів надійності комплексів, а також машин, механізмів, приладів та інших промислових виробів, що входять до їх складу. У цих умовах звичайні методи визначення якості дослідних і серійних виробів, тривалі стендові випробування натурних об'єктів (трібосистем) стають неприйнятними, оскільки терміни служби досягають декількох років або навіть десятків років. У зв'язку з цим проблема розробки і застосування методів прискорених випробувань набула характеру загально технічної проблеми.

На сьогодні одержали найбільше поширення два методи скорочення тривалості випробування виробів: прогнозування ресурсу (надійності) за результатами вироблення випробуванням виробом частини ресурсу при номінальних режимах навантаження; застосування при випробуваннях форсованих режимів, тобто більш жорстких, ніж в експлуатації.

Прискорення випробувань за рахунок одного, так званого визначального параметра, впливає на процеси тертя і зношування та вироблення ресурсу окремими елементами виробу і дозволяє лише провести випробування слабкої ланки, а не тріботехнічної системи в цілому. Тому необхідно застосовувати моделі, загальні принципи і положення яких можуть бути основою для розробки особистої методики випробувань виробів. Така модель повинна описувати, насамперед, фізичну суть процесів, що відбивають зв'язок конструктивних і технологічних особливостей машини і їх деталей, з умовами експлуатації. Критерії подібності для досліджуваної фізичної системи можуть бути визначені методом подібності, розмірності, енергетичним та іншими, але обов'язково повинні мати сферу застосування, обмежену умовами адекватності фізичних полів у моделі і у натурального об'єкта. Обмеження меж зміни навантаження (ступінь форсування) здійснюється з урахуванням максимально припустимих меж їхнього застосування, встановлюваних аналітично або на підставі попередніх експериментів.

Фізичне моделювання

При розробці конструкції трібосистеми і виборі матеріалів для нього виникає необхідність вивчення впливу змінних умов, що визначають поведінку реального складного об'єкта. Звичайно при цьому мають неповну

вихідну інформацію: недостатньо вивчений фізичний зміст процесів на фрикційному контакті, особливо для нових класів матеріалів, невідомий математичний опис або метод його розв'язання. Такого роду трибологічні задачі успішно вирішуються за допомогою фізичного моделювання.

Фізичним моделюванням називають дослідження фізично подібних процесів на установках, що зберігають фізичну природу явищ, але відтворюють їх в інших розмірах у розумінні геометричному або фізичному.

Особливістю моделі при фізичному моделюванні є її однакова природа з натурним об'єктом (натурою), тобто в обох випадках застосовуються ті самі: кінематичні схеми контакту; розташування матеріалів у рухомого і нерухомого трибоелементів; коефіцієнт взаємного перекриття; мастильні матеріали.

За допомогою фізичного моделювання вирішуються задачі виявлення залежностей коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування і температури тертя від узагальненої інформації про функціонування і властивості трибосистем. Закон моделювання визначається у вигляді розрахункового масштабного фактора, що є сукупністю всіх масштабних коефіцієнтів переходу від моделі до натури для параметрів режиму роботи, матеріалів трибосистем і конструкції, включених до критеріїв подібності. Для накопичення інформації в банках даних дуже важливо використовувати при випробуваннях серійні машини тертя і типові трибоелементи, що дозволить надалі порівнювати без перерахувань результати, отримані різними дослідниками. Можливі реалізації випробувань на малогабаритних моделях у зміненому (звичайно прискореному) масштабі часу і оцінювання точності моделювання.

Зв'язки між параметрами моделі і натури попередньо встановлюються розрахунковим шляхом. Розрахунок звичайно передують трьохетапний аналіз моделюючих трибоспрямижень.

По-перше, система розчленовується на підсистеми у вигляді графічних моделей, для кожної з яких застосовні такі фундаментальні фізичні моделі, як механічна (рис. 14.1, а), теплофізична (розподілу теплових потоків між елементами трибосистеми рис. 14.1, б), макроконтактування (рис. 14.1, в, A_c і A_r змінюються в часі за значенням і взаємним розташуванням), мікроконтактування (рис. 14.1, г, генерується теплота, можливе зрушення тонкого шару, що включає окисні плівки або плівки мастильного матеріалу). Показана на рис. 14.1 модель може бути доповнена підмоделями електричних явищ, хімічних перетворень тощо. Для кожної підсистеми виявляються на основі апріорної інформації види порушення фрикційного зв'язку за І.В. Крагельським (рис. 14.2).

По-друге, на основі аналізу графічного зображення підсистем будується ієрархічна модель, метою якої є виявлення визначальних, основних і побічних параметрів. Визначальні параметри впливають на всі підсистеми, основні – тільки в межах однієї або декількох підсистем, побічні – впливають несуттєво (до 10...15 %) на тертя або зношування.

По-третє, встановлюється зв'язок між функціональними залежностями

$f_m = \psi(p_{m1}, p_{m2}, p_{m3}, \dots, p_{mi})$ вихідних характеристик (коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування, температури тертя) від параметрів від p_1 до p_i досліджуваного процесу для моделі і аналогічних залежностей для натури $f_n = \psi(p_{n1}, p_{n2}, p_{n3}, \dots, p_{ni})$. Наприклад, p_1 – швидкість, p_2 – навантаження, p_3 – коефіцієнт взаємного перекриття та інш.

Для встановлення такого зв'язку застосовують методи розмірності, подібності, енергетичний, енергоінформаційний та їх комбінації. Ці методи дають позитивні результати і у тих випадках, коли невідомий математичний опис процесів, що складається методами математичної фізики.

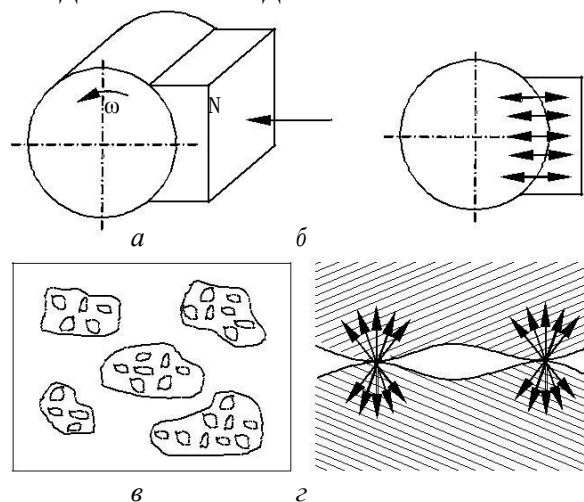


Рис. 14.1. Графічна модель процесу тертя. Підмоделі: *a* – механічна; *б* – теплофізична; *в, г* – макроконтрактування і мікроконтрактування елементів трібосистем

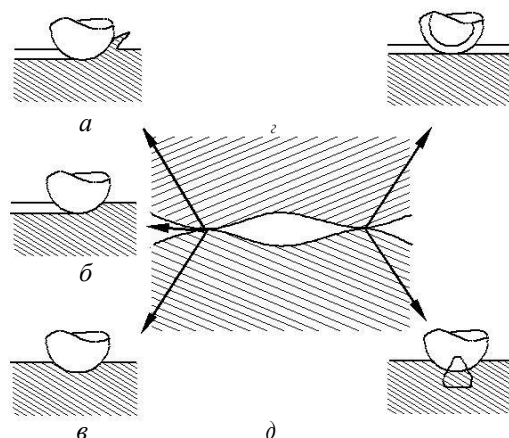


Рис. 14.2. Основні види порушення фрикційних зв'язків (руйнування мікроконтакту при зношуванні по І.В. Крагельському):

a – абразивне ($n = 1$); *б* – пластичне відтискування ($1 < n < \infty$), n – число циклів до руйнування; *в* – утомне ($n \rightarrow \infty$); *г* – адгезійне руйнування плівок, що схоплюються, ($n = 1$); *д* – заїдання

При реалізації методів визначення закону фізичного моделювання обов'язково враховуються додаткові положення. Так, випадковий вибір масштабних коефіцієнтів при визначенні закону моделювання неприпустимий,

тому що добуток ступеневих функцій масштабних коефіцієнтів підлягає суворій залежності. Складні системи подібні, якщо подібні всі складові їх підсистеми. Складні системи залишаються подібними, якщо до них приєднується будь-яка кількість подібних підсистем, що особливо важливо для так званих систем, що розвиваються, коли в міру одержання додаткової інформації, наприклад, про явища на фрикційному контакті, пов'язаних з появою трибоелектрики, створюється відповідна нова підмодель. Подібні процеси, що протікають у геометрично неподібних системах, мають пропорційні подібні характеристики в геометричних подібних точках.

Імовірнісні (стохастичні) системи подібні, якщо виконується умова пропорційності математичних очікувань або дисперсій подібних параметрів моделі і натури. При цьому варто враховувати, що композиція досить великої кількості практично довільних законів розподілу дає результуючий розподіл, як бажане близьке до нормального.

Фізичне моделювання базується на трьох теоремах аналізу подібності. Існують різні варіанти формулювань цих теорем, але зупинимось на тих з них, що найбільш корисні для фізичного моделювання у трибології.

Перша теорема подібності. У подібних явищ визначені сполучення параметрів, критерії подібності чисельно рівні. Прикладом таких сполучень параметрів є узагальнені змінні. Під критерієм подібності мається на увазі узагальнена змінна – безрозмірний комплекс фізичних величин, що визначає той чи інший фізичний процес. Деякі критерії при моделюванні вироджуються в симплекси – відношення однойменних фізичних величин. Прикладом симплекса є широко застосовуване в теорії тертя відношення висоти нерівності до її радіуса. Критерії можна множити або ділити один на один або на один з них, а також на постійну величину, підносити до степеня, одержуючи нові критерії. Метод одержання узагальненої змінної розглянутий нижче.

Друга теорема подібності. Первинну інформацію, задану у вигляді співвідношення між m розмірними параметрами, що визначають фізичний процес, можна перетворити на вторинну інформацію у вигляді n безрозмірних узагальнених змінних, де $n = m - k$. Тут k – кількість основних одиниць, розмірність яких незалежна і які не можуть бути об'єднані в яку-небудь узагальнену змінну.

Третя теорема подібності. Необхідною і достатньою умовою подібності систем є пропорційність усіх подібних характеристик, що входять в умови однозначності. Умови однозначності, або граничні крайові умови досліджуваних явищ, включають такі: геометричні, що характеризують форму і розміри елементів трибосистеми, наприклад, комплекс геометричних розмірів; фізичні, що характеризують фізичні властивості середовища і контактуючих тіл, наприклад, їхні теплофізичні і механічні характеристики; граничні, що характеризують особливості протікання процесу на границях тіл, що пов'язано з теплоутворенням і окиснюванням у зоні контакту, і, нарешті, часові, що характеризують особливості протікання процесу в часі, тобто його стаціонарність або не стаціонарність.

Узагальнені змінні можуть бути отримані одним із трьох найбільш розповсюджених способів: методом подібності, методом розмірності або з загальних фізичних міркувань. Узагальнені змінні використовуються для рішення трьох класів задач, що належать до сфери фізичного моделювання. Перший клас – це зменшення обсягу вихідної інформації шляхом об'єднання параметрів в узагальненій змінній і виявлення залежностей вихідних характеристик (коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування) від тієї чи іншої узагальненої змінної і надалі прогнозування на підставі цих даних працездатності тріботехнічної системи (рис. 14.3). Другий клас – це розрахунок масштабного фактора і з урахуванням останнього призначення для моделі таких режимів випробування, що забезпечують одержання на моделі трібологічних характеристик, близьких до натурних, і, нарешті, третій клас – факторне планування тріботехнічного експерименту, коли як фактори використовують узагальнену змінну. Застосовуючи узагальнену змінну вдається скоротити кількість змінних, об'єм експериментів і подавати інформацію в стисnutій формі у вигляді рівняння.

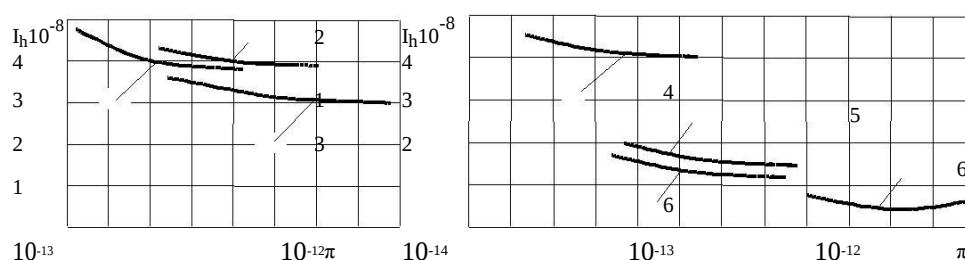


Рис. 14.3. Залежність інтенсивності лінійного зносу I_h від узагальненої змінної $\pi = m_{1,2} a_{1,2}^3 D_{1,2}^3 / HB_{1,2}$ на прикладі металічних (а) і порошкових (б) матеріалів контактних вставок з залізографіту:
1 – Al-9; 2 – ZnAl; 3 – АСЧ-2; 4 – ЖГр-2; 5 – ЖГр-3; 6 – ЖГр-4; 7 – ЖГр-5

В тріботехнічних задачах узагальнена змінна може виявлятися різними методами подібності і розмірності. Розрахунок масштабного фактору показаний в табл. 14.1.

Таблиця 14.1. Обов'язкові операції, які використовуються при фізичному моделюванні

Операція	Результат	Математичний вираз	Галузь використання
Розробка графічної моделі трібологічного процесу (системи)	Урахування параметрів, які визначають систему в цілому і кожну підсистему	p_{111}, p_{112} або p_{411}, p_{412} , наприклад, $\lambda_{111}, \lambda_{112}$	Вибір вихідних даних для отримання УЗ

Розробка структурної ієрархічної моделі системи	Виявлення взаємодії між системою і підсистемами		Виявлення визначних, основних і побічних параметрів. Призначення базисних параметрів
Отримання узагальненої змінної	Об'єднання визначних і основних параметрів в безрозмірні комплекси	$\pi_1 = \frac{p_{1g}}{\frac{b_{11}}{p_{11}} \cdot \frac{b_{12}}{p_{12}} \cdot \frac{b_{13}}{p_{13}} \cdot \frac{b_{14}}{p_{14}} \cdot \frac{b_{15}}{p_{15}} \cdot \frac{b_{16}}{p_{16}}}$ $\pi = \frac{p_{ig}}{\frac{b_{i1}}{p_{i1}} \cdot \frac{b_{i2}}{p_{i2}} \cdot \frac{b_{i3}}{p_{i3}} \cdot \frac{b_{i4}}{p_{i4}} \cdot \frac{b_{i5}}{p_{i5}} \cdot \frac{b_{i6}}{p_{i6}}}$	Прогнозування вихідних характеристик (f, I) трібоспряження, систематизація результатів і планування експерименту
Розрахунок масштабного фактора при умові подібності моделі і натури	Отримання масштабних коефіцієнтів переходу від моделі до натури для кожного параметру матеріалу, конструкції, процесу	α_1 $p_m = p_{n11} C_{z1.2}, \dots$ $p_{mi} = p_{ni1} \cdot C_{z1.2}^{\alpha_i}$	Прискорене отримання на моделях вихідних характеристик трібоспряження
Планування модельного експерименту	Вибір стратегії, яка дозволяє зменшити об'єм експериментів і подати інформацію в стислому вигляді	Наприклад, $f = K_1 - K_2 \pi_1 - K_3 \pi_2 + K_4 \pi_3 + \dots$	Організація лабораторних модельних випробувань і формування за їх результатами банку трібологічних даних
Оцінювання достовірності випробувань	Нормування допустимої похибки	$\varepsilon^z = z \cdot \frac{\sigma^z}{\alpha} \cdot h$	Виробка рекомендацій щодо проектування і ремонту трібоспряжень

Метод подібності дозволяє одержати узагальнену змінну у рамках математичної моделі, раніше складеної і апробованої. При цьому враховується правило розмірності Фур'є, відповідно до якого розмірність у лівій і правій частинах рівняння повинна бути однаковою, і вимагає, щоб узагальнена змінна була безрозмірною.

Таким чином, маючи рівняння (алгебраїчне, диференціальне, інтегральне) виду $AB + CD = E$, необхідно для одержання узагальненої змінної ліву частину поділити на праву. У результаті можуть бути використані дві узагальнені змінні: AB/E і CD/E .

Метод розмірності не обмежений рамками певної визначеної моделі, тому завжди існує небезпека одержання з його допомогою узагальнених змінних, некоректних з позицій фізики.

Одержання узагальненої змінної методом розмірності складається з трьох послідовних етапів:

- вибір базисних параметрів, порівняння і рішення базисного дільника;
- зв'язок з базисними параметрами інших розмірних величин;
- на основі перших двох етапів записується формула узагальненої змінної і перевіряється на безрозмірність.

1-й етап. У системі основних одиниць MLT (кг,м,с) будь-який параметр трібоспряження (швидкість, навантаження і т. ін.) може бути позначений $p_{11} = [M^{\alpha_1} L^{\beta_1} T^{\gamma_1}]$.

Якщо з метою одержання замкнутого математичного опису вибрати три базисних параметри, то базисний визначник (детермінант) буде мати такий вигляд:

$$D_0 = \begin{vmatrix} P^{MLT} \\ p_{11} \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \\ p_{13} \alpha_3 \beta_3 \gamma_3 \end{vmatrix}, \text{ де } D_0 \neq 0. \quad (14.1)$$

2-й етап. Для параметра $p_{15} = [M^{\alpha_5} L^{\beta_5} T^{\gamma_5}]$, замінивши по черзі рядки в базисному визначнику рядком з розмірністю цього параметра, отримаємо:

$$D_{511} = \begin{vmatrix} \alpha_5 \beta_5 \gamma_5 \\ \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \\ \alpha_3 \beta_3 \gamma_3 \end{vmatrix}; D_{512} = \begin{vmatrix} \alpha_5 \beta_5 \gamma_5 \\ \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \\ \alpha_3 \beta_3 \gamma_3 \end{vmatrix}; D_{513} = \begin{vmatrix} \alpha_5 \beta_5 \gamma_5 \\ \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \\ \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \end{vmatrix}. \quad (14.2)$$

Рядок з розмірністю параметра p_{15} спочатку займає місце рядка з розмірністю параметра p_{11} (верхній визначник), після параметра p_{12} (середній визначник) і параметра p_{13} (нижній визначник).

3-й етап. Узагальнена змінна для параметра p_{15} буде мати вигляд:

$$\pi_{p_{15}} = \frac{p_{15}}{p_{11}^{D_{011}} p_{12}^{D_{012}} p_{13}^{D_{013}}}. \quad (14.3)$$

Приклад. Для отримання узагальненої змінної з базисними параметрами v , P , $\kappa_{21,2}$ зв'язати щільність обох матеріалів $p_{1,2}$ трібосистеми.

$$D_0 = \begin{vmatrix} P^{MLT} \\ v \kappa_{21,2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 01 & -1 \\ 11 & -2 \\ 06 & 0 \end{vmatrix} = -6; \quad D_{011} = \begin{vmatrix} 2 & -60 \\ 11 & -2 \\ 06 & 0 \end{vmatrix} = 24;$$

$$D_{012} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 2 & -6 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \end{vmatrix} = -12; \quad D_{013} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 2 & -6 & 0 \end{vmatrix} = 4.$$

Узагальнена змінна (безрозмірна)

$$\pi_{p1,2} = \frac{\rho}{v^{24} / \frac{-6}{b} \frac{-12}{-6} K_{z1,2}^{4-6}} \frac{\rho}{v_{1,2}^4} \frac{1}{d_a^2} = \frac{1}{Ne_{1,2}},$$

де Ne – критерій Ньютона.

14.2. Математичне моделювання. Імітаційне і аналогове моделювання

Математичне моделювання засноване на математичній подібності і на ізоморфізмі рівнянь, тобто здатності їх описувати різні за природою явища і виявляти різні функціональні зв'язки, використовуючи здатність рівнянь описувати окремі сторони поведінки системи.

Теорія подібності є основою для створення алгоритму певної послідовності обчислювальних операцій, що пов'язує методи експерименту з обчислювальною технікою.

При побудові моделі реальне явище неминуче спрощується, схематизується, і ця схема (графічна модель явища) описується за допомогою того чи іншого математичного апарата.

Модель створюється з урахуванням цільової спрямованості мети дослідження, необхідної точності і попередньо відомої інформації. Так, якщо вихідні дані, використовувані в розрахунках, відомі неточно, мають стохастичну природу та істотне розсіювання, то, мабуть, невиправданою є розробка дуже точної моделі і великі витрати часу на тонку та точну оптимізацію рішення.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні і статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують меншу кількість факторів, завжди вимагають певних допущень і спрощень. Однак результати розрахунку по них легше оглядові, чітко відбивають властиві явищу основні закономірності і, головне, більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Статистичні моделі в порівнянні з аналітичними більш точні і докладні, не вимагають настільки грубих допущень, дозволяють врахувати велику (теоретично – необмежено велику) кількість факторів. Недоліки – громіздкість, погана видимість, велика витрата машинного часу, а головне, крайні труднощі пошуку оптимальних рішень, що доводиться знаходити методом спроб і здогадів.

Імітаційне моделювання – методологія експериментально-теоретичного вирішення технічних задач керування складним трібоспряженням.

Імітаційне моделювання застосовується для процесів, у хід яких може час від часу втручатися людина (або група людей). Людина, що керує операцією (випробувач), може в залежності від сформованої обстановки приймати ті або інші рішення. Потім приводиться в дію математична модель, що показує, яка очікується зміна обставин у відповідь на це рішення і до яких наслідків воно призведе через деякий час. Наступне рішення керівника приймається вже з урахуванням нових обставин. У результаті багаторазового повторення

такої процедури керівник приймає найбільш правильне рішення, яке можна віднести до числа оптимальних.

Імітаційна модель являє собою сукупність взаємодіючих елементів: компонентів (підсистем), параметрів, змінних, функціональних залежностей, обмежень, цільових функцій.

Компоненти є підсистемами загального трібоспряження. Іноді підсистема може бути вироджена до розмірів окремого елемента. Змінні – частина параметрів системи (підсистеми), що можуть набувати значення, обумовлені видом функціональної залежності. Як обмеження випробувачем встановлюються границі застосування трібосистеми за швидкістю, навантаженням, температурою.

Перед побудовою імітаційної моделі аналізується апріорна інформація про працездатність трібоспряження, його підсистем і елементів.

На відміну від методів аналогового і аналітичного (математичного) моделювання імітаційна модель дозволяє, по-перше, скоротити час рахунку, по-друге, замінити рішення частин задачі (підсистеми), що не мають коректного математичного опису, на експериментальне одержанням емпіричних залежностей, що використовуються при вирішенні задачі (системи) у цілому.

Аналогове моделювання. Цей вид моделювання базується на однаковому для моделі і натури математичному описі і використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи за її елементами. При цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає визначений еквівалент.

Як моделі використовуються електричні ланцюги, складені з пасивних елементів L , C , R , джерел струму і напруги і електронних операційних підсилювачів. Конструктивно вони реалізуються у вигляді систем, що являють собою тверде або рідке провідне середовище, відповідно до підібраної форми, або, що складаються з пасивних елементів електричного ланцюга, або, нарешті, що містять, поряд з пасивними блоками, елементи з операційними підсилювачами. Теплопровідність матеріалів моделюється електропровідністю, теплоємність – електричною ємністю, тепловий потік – електричним струмом, що підводиться до моделі і т. ін. З урахуванням передбачуваних меж зміни змінних, встановлюють для операційних підсилювачів масштаби (константи подібності). Значення максимумів і мінімумів призначають на підставі аналізу умов подібності.

В електричному аналоговому моделюванні теплових і силових полів у трібосистемах застосовують метод суцільних середовищ і метод електричних сіток. У першому випадку моделлю служить поле електричного струму в суцільному провідному середовищі, наприклад, у вигляді пластин з паперу або пластмаси. В другому – застосовують електричні ланцюги з зосередженими параметрами. Модель у цьому випадку являє собою електричну мережу, у якій дискретно розміщені схеми заміщення. Сфера застосування методу суцільних середовищ, що відрізняється простотою і більшою точністю відповідності між граничними умовами натури і моделі, обмежена задачами математичної фізики, які зводяться до рівнянь Лапласа.

Метод електричних мереж більш універсальний і використовується, звичайно для дослідження неоднорідних фізичних полів. Зокрема, за допомогою електропровідного паперу різних сортів були імітовані різні теплофізичні властивості матеріалів трібосистеми сірий чавун СЧ 18-36 (гальмовий барабан) – фрикційна асбополімерна композиція 6КХ-4Б (гальмова накладка). Методом аналогового моделювання були оцінені коефіцієнти розподілу теплових потоків, вплив кута охоплення, ширина доріжки тертя і інших конструктивних параметрів на температуру поверхні тертя, співвідношення між максимальними значеннями температури передніх і основних коліс транспортного засобу.