

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-2-78-43>

УДК 621.3.047.42:004.942

Ситник О.О., Кисельов В.Б., Кисельова Г.О.
Черкаський державний технологічний університет

ПРО ОДИН З МЕТОДІВ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПЛІВКОВИХ ПОТЕНЦІОМЕТРІВ

Анотація. Стаття присвячена побудові математичної моделі зносу контактних пар ковзання плівкових потенціометрів, що описує функціональні зв'язки вихідних параметрів з основними процесами роботи. Фізичні явища, що виникають в електричних контактних парах ковзання плівкових потенціометрів відносяться до недостатньо вивчених багатofакторних процесів. Одним з основних факторів тут є величина і рід струму, що породжують електричні розряди, електричну та місткову ерозію, місцеве нагрівання, розплавлення і перенесення металу, що погіршують стан контактуючої поверхні і надійності контактування. Для дослідження таких процесів в наш час широко використовується метод ідентифікації, що дозволяє поєднувати наявну неповну ґносеологічну і отриману дослідним шляхом стохастичну інформацію. З метою визначення оцінки зносу електричних контактних пар плівкових потенціометрів були використані енергетичні критерії. Запропоновано також методику оцінки додаткового зносу контактної пари плівкових потенціометрів під струмом. Отримані рівняння можуть бути використані для аналізу роботи рухомих електричних контактних пар працюючих без мастила.

Ключові слова: контактні пари ковзання, математична модель, плівкові потенціометри, динаміка електричних процесів, електрична ерозія.

Sytnyk Oleksandr, Kyselov Vladlen, Kyselova Hanna
Cherkasy State Technological University

ON ONE OF THE METHODS FOR CONSTRUCTING A MATHEMATICAL MODEL OF THE WEAR RESISTANCE OF FILM POTENTIOMETERS

Summary. The article is devoted to the construction of a mathematical model of wear of contact pairs of sliding film potentiometers, describing the functional relationships of output parameters with the main processes of operation. Physical phenomena that occur in electrical contact pairs of sliding film potentiometers belong to insufficiently studied multifactorial processes. One of the main factors is the magnitude and type of current. The current generates electrical discharges, electrical and bridge erosion, local heating, melting, and metal transfer. This improves the condition of the contact surface and the reliability of the contact. Mechanical processes in the contact zone caused by dynamic modes of contact steam operation. This determines the dependence of the transient resistance on the magnitude of contact pressures and stresses, the type of deformation processes in the contact material, the magnitude of shock and vibration loads associated with movement, the speed of movement of current collectors, the coefficient of friction, and other mechanical factors. For the study of such processes, the identification method is widely used nowadays, which allows combining the available incomplete epistemological and empirically obtained stochastic information. Depending on the magnitude of tangential stresses and the state of the surfaces of bodies that connect at the point of contact, all three types of deformation processes can occur: elastic contact, plastic deformation, and micro-cutting due to wear particles. The amount of material worn during micro-cutting will be proportional to the energy of the cut forces. Within the contact area of the spherical contact, individual points are plastically deformed, but the deformation of the common contact area will be elastic and can be calculated using the Hertz formula. The total amount of wear for contact pairs of current-driven devices with a constant number of operating cycles can be represented as the sum of two components: mechanical wear at a current equal to zero; additional wear due to the passage of current through the contacts. Energy criteria were used to determine the wear assessment of electrical contact pairs of film potentiometers. A method for estimating additional wear of the contact pair of film potentiometers under current is also proposed. The resulting model can be used to ensure reliable contact of film potentiometers during long-term and short-term operation under the influence of climatic and mechanical factors. The obtained equations can be used to analyze the operation of mobile electrical contact pairs operating without lubrication.

Keywords: contact slip pairs, mathematical model, film potentiometers, dynamics of electrical processes, electrical erosion.

Постановка проблеми. Потенціометри знайшли застосування в антенних станціях наземного і бортового базування, рульових приводах і приводах механізації крил літальних апаратів, вимірювальних і виконавчих механізмах дорожньо-будівельних машин, системах наведення, підйомних кранах, верстатах і незважаючи на появу в даний час цифрових потенціометрів, інтерес до плівкових потенціометрів не слабшає. До числа причин збереження їх популярності слід віднести хороші точнісні характеристики і високу надійність, а також можли-

вість моментального відновлення коефіцієнта перетворення, що відповідає його поточному положенню, після втрати живлення, що недоступно цифровим датчикам [1; 2]. В арсеналі засобів автоматизації широке застосування знаходять різні типи потенціометричних датчиків, які широко застосовуються при створенні різних приладів і систем управління. В першу чергу це відноситься до плівкових і дротяних потенціометрів.

На роботу потенціометрів істотний вплив має склад і параметри навколишнього середовища, що викликають протікання різних фізико-

хімічних процесів, як-то: хімічних реакцій з утворенням поверхневих плівок; кінетичні процеси старіння, які змінюють структуру і фізичні властивості контактуючих матеріалів [1; 2; 3].

Механічні процеси в зоні контактування, обумовлені динамічними режимами роботи контактної пари, що зумовлюють залежність перехідного опору від величини контактних тисків і напруженостей (переважно виду деформаційних процесів в матеріалі контактів) величини ударних і вібраційних навантажень, пов'язаних з рухом, швидкістю переміщення струмознімачів, коефіцієнта тертя та інших механічних факторів [4; 5].

Динаміка електричних процесів в зоні контактування також характеризується великою різноманітністю і складністю явищ які відбуваються. Основним фактором тут є величина і рід струму, що породжують електричні розряди, електричну та місткову ерозію, місцеве нагрівання, розплавлення і перенесення металу, що погіршують стан контактуючої поверхні і надійності контактування [4; 6].

Аналіз основних досліджень і публікацій.

Робота електричних контактних пар ковзання плівкових потенціометрів супроводжується зносом контактуючих матеріалів внаслідок тертя і електричної ерозії. Протягом останніх десятиліть проводилися трибологічні випробування, математичне моделювання та моделювання для вивчення природи і наслідків механічного зносу матеріалів з покриттям і без покриття. Були розроблені математичні моделі і в унісон із спеціально розробленими емпіричними тестами була досліджена достовірність цих моделей [1–5]. Дослідження були зосереджені на різних механізмах зношування: стирання, адгезії, ерозії, корозійному зносі, втомному зносі, а також на різних їх комбінаціях [5].

Існують чотири основні теорії, які використовуються в якості основи для побудови моделі зносу: підхід балансу маси, підхід балансу енергії, аналіз напруг (деформацій) і підхід контактної механіки для визначення поведінки матеріалу [5].

Істотний і фундаментальний внесок у дослідження по надійності електричних контактів вніс Р. Хольм [6], однак явища електричного контактування залишаються ще недостатньо вивченими.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. На основі проведеного аналізу літературних джерел по роботі контактних пар ковзання у різних умовах їх експлуатації слід вважати перспективними дослідження в таких основних напрямках:

1. Забезпечення надійності контактування плівкових потенціометрів в процесі тривалої і короткочасної експлуатації при впливі кліматичних і механічних факторів. Це проблема охоплює питання вибору оптимальної конструкції плівкових потенціометрів з урахуванням вібро- і ударостійкості, окислюваності контактних пар та релаксації пружних ланок струмознімачів.

2. Теоретичні та експериментальні дослідження зносостійкості контактних пар з метою підвищення технічного ресурсу плівкових потенціометрів. В цьому напрямку слід вважати перспективними роботи по зносостійкості «сухих» і змащених реальних контактних пар, що враховують вплив механічних навантажень в зоні контактування, температури та складу середовища.

3. Теоретичні та експериментальні дослідження електричної ерозії та інших електрофізичних процесів у зоні тертя з метою підвищення працездатності контактних пар під струмовим навантаженням.

Метою даної статті є побудова математичної моделі зносостійкості плівкових потенціометрів під струмовим навантаженням.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відомо [6], що об'єм V зношеного матеріалу залежить від величини витраченої на один перехід (цикл) енергії W і числа циклів N напрацювання ресурсу, тобто $V = f(W, N)$. У цьому випадку диференціальне рівняння зносу має вигляд:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial W} dW + \frac{\partial V}{\partial N} dN. \quad (1)$$

Якщо площа поперечного перерізу Q сліду зносу по довжині контактування l не змінюється, тобто $V \sim Q$, де \sim – знак пропорційності, то можна записати:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial W} dW + \frac{\partial Q}{\partial N} dN. \quad (1a)$$

Наведені рівняння використовуються для аналізу роботи контактних пар, що працюють з мастилом, для яких характерно змінне значення енергії на кожному переході $W = \text{var}$. Для «сухих» контактних пар знос в сталому режимі характеризується постійністю енергії на кожному переході $W = \text{const}$, що призводить до спрощення диференціальних рівнянь:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial N} dN; \quad (2)$$

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial N} dN. \quad (2a)$$

Звідси випливає, що при $l \cdot W = \text{const}$ $V \sim W \cdot N$ або $Q \sim W \cdot N$.

Витрачена в процесі тертя і зносу механічна енергія одного переходу залежить від значення максимальних дотичних напруг або контактної тиску P_k і довжини шляху переходу l , тобто $W = f_1(\tau, l)$ або $W = f_2(P_k, l)$.

Залежно від величини дотичних напруг і стану поверхонь тіл, що сполучаються в місці контактування можуть проявлятися всі три види деформаційних процесів: пружне контактування, пластична деформація і мікрорізання за рахунок частинок зносу.

При пружному контактуванні знос відбувається за рахунок тривалої фрикційної втоми, а при пластичній деформації за рахунок сил зминання і малоциклическої фрикційної втоми, тому об'єми зносу будуть в обох випадках пропорційні енергії тертя W_f , але з різними значеннями коефіцієнтів пропорційності.

Об'єм зношеного при мікрорізанні матеріалу буде пропорційний енергії сил зрізу W_s .

На рис. 1 представлений слід зносу пари площина-сфера при незмінному радіусі сфери R .

Для визначення закономірності знос контактних пар площина-сфера в загальному випадку при $W = \text{var}$ в рівняння (1), а при $W = \text{const}$ в рівняння (2) необхідно підставити відповідні похідні і зробити їх інтегрування.

Рішення поставленого завдання доцільно представити для «сухих» контактних пар (випадок $W = \text{const}$).

Обрана методика досліджень дозволяє аналізувати об'єм зношеного матеріалу розглянутих контактних пар по узагальненому параметру зносу висоти H або хорді T .

Відповідно до позначень прийнятих на рис. 1 при постійному значенні довжини переходу l поперечний переріз сліду зносу Q при $H \ll R$ визначиться з рівнянь:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot H \cdot T; \quad (3)$$

$$H = \frac{T^2}{8 \cdot R}. \quad (4)$$

Після підстановки (4) в (3) і диференціювання, отримуємо:

$$Q = \frac{T^3}{16 \cdot R} = C_Q \cdot T^3; \quad (5)$$

$$dQ = \frac{3 \cdot T^2}{16 \cdot R} dT = 3C_Q \cdot T^2 dT. \quad (6)$$

Елементарні енергії на одному переході для сил тертя W_f і сил зрізу W_s при незмінному значенні радіусу контактування сфери R_f можна виразити:

$$dW_f = K_f \cdot P_k dl; \quad (7)$$

$$dW_s = \tau_s \cdot dQ dl, \quad (8)$$

де τ_s – межа плинності на зріз;

K_f – коефіцієнт тертя;

Q – поперечний переріз сліду на одному переході.

Після інтегрування на довжині контактування l з урахуванням N переходів, отримуємо значення сумарної механічної енергії, витраченої на знос:

$$W_{f\Sigma} = K_f \cdot P_k \cdot l \cdot N;$$

$$W_{s\Sigma} = \tau \cdot \frac{T^3}{16 \cdot R} \cdot l \cdot N.$$

де K_f – коефіцієнт тертя;

P_k – контактний тиск;

N – кількість переходів;

τ – напруга зрізу;

$\frac{T^3}{16 \cdot R} = Q$ – площа перетину зносу за один перехід.

Відомо [6], що в межах площі контактування сферичного контакту окремі точки пластично деформуються, однак деформація загальної площадки контакту буде пружною і може розраховуватись за формулою Герца [4; 5], відповідно до якої, для випадку пружного контактування пари площина-сфера, розмір плями контактування $T \sim \tau \sim P_k^{\frac{1}{3}}$. Тоді енергія сил тертя $W_{f\Sigma}$ і зрізу $W_{s\Sigma}$ на одиницю довжини шляху виразиться:

$$W_{f\Sigma} \sim \tau^3 \cdot N \sim P_k^{\frac{1}{3}} \cdot N,$$

$$W_{s\Sigma} \sim \tau^4 \cdot N \sim P_k^{\frac{4}{3}} \cdot N.$$

Так як при постійному значенні енергії в процесі зносу W контактний тиск P_k і внутрішня напруга τ повинні залишатися незмінними, то, прийнявши $W \sim Q \sim T^3$, отримуємо наступні рівняння зносу:

$$T_f \sim \tau \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_k^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}}; \quad (9)$$

$$T_s \sim \tau^{\frac{4}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_k^{\frac{4}{9}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (10)$$

Перехід від об'ємного (V) зносу до лінійного (T або H) пов'язаний з наявністю в промисловос-

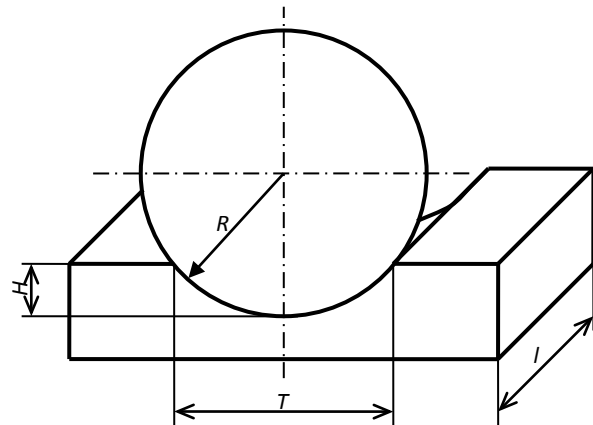


Рис. 1. Слід зносу пари площина-сфера при незмінному радіусі сфери R

ті засобів контролю, що в значній мірі полегшує проведення і замір даних експериментів.

Якщо взяти рівно імовірними дії сил тертя і зрізу, то можна записати

$$Q = K_Q \cdot \tau^{\frac{7}{2}} \cdot N, \quad (11)$$

звідки

$$T \sim \tau^{\frac{7}{6}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_k^{\frac{7}{18}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (12)$$

Якщо виходити з емпіричної інженерної моделі зносу [5], то прийнявши

$$Q \sim (\tau \cdot l)^{\frac{9}{2}} \cdot N,$$

отримаємо

$$T \sim \tau^{\frac{3}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}} \sim P_k^{\frac{1}{2}} \cdot N^{\frac{1}{3}}. \quad (13)$$

Сумарний об'єм зносу для контактних пар ковзання під струмом при постійному числі циклів напрацювання N можна представити у вигляді суми двох складових:

$$V_{\Sigma} = V_m + V_I, \quad (14)$$

де V_m – механічний знос при струмі, що дорівнює нулю;

V_I – додатковий знос, обумовлений проходженням струму I через контакти, тобто струмовий знос.

У загальному випадку величина струмового зносу може бути представлена рівнянням [6]:

$$V_I = C \cdot I^{\alpha}, \quad (15)$$

де α – показник ступеня впливу струму на знос.

Формула об'єму сумарного зносу може бути виражена через відносну величину бічного зносу:

$$V_{\Sigma} = V_m \cdot \left(1 + \frac{V_I}{V_m}\right), \quad (16)$$

Або

$$V_{\Sigma} = V_m \cdot (1 + K_I \cdot I^{\alpha}), \quad (17)$$

де $K_I = \frac{C}{V_m}$ – відносний коефіцієнт струмового навантаження.

Стосовно до параметру зносу T сферичних контактних пар в загальному випадку об'єм зносу можна представити рівнянням:

$$V = m \cdot T^3.$$

Тоді

$$\frac{V_{\Sigma}}{V_m} = \left(\frac{T_{\Sigma}}{T_m}\right)^3.$$

Прийнявши $t = \frac{T_z}{T_m}$, з урахуванням рівняння (17) отримаємо:

$$t = (1 + K_I \cdot I^\alpha)^{\frac{1}{3}}. \quad (18)$$

У рівнянні (18) коефіцієнт K_I і показник ступеня α необхідно визначати за даними досліду. Для цього зручно скористатися рівнянням

$$\lg(t^3 - 1) = \lg K_I + \alpha \cdot \lg I, \quad (19)$$

отриманим після логарифмування рівняння (18). При цьому залежність (19) виражається рівнянням прямої, де $\lg K_I$ – початкова координата, а показник ступеня α дорівнює тангенсу кута нахилу прямої лінії.

Висновки і пропозиції. Таким чином проведена розробка єдиних критеріїв оцінки зносу потенціометрів при їх проектуванні й експлуатації. Для вирішення даної проблеми було створено математичну модель механічного зносу контактних пар ковзання для плівкових потенціометрів при постійному значенні енергії в зоні тертя. Розроблена методика обліку додаткового зносу контактних пар ковзання за рахунок струмової комутації, запропоновано математичну модель струмового зносу. Отримані рівняння можуть бути використані для аналізу роботи рухомих електричних контактних пар працюючих без мастила.

Список літератури:

1. Ишков А.С., Светлов А.В., Солодимова Г.А., Торгашин С.И. Контроль технического состояния резистивных потенциометров с применением растровой электронной микроскопии. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2017. № 4(22). С. 77–83.
2. Недорезов В.Г., Цыганков А.И. Влияние продуктов износа контактной пары потенциометра на надежность его работы. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», в 2 т. Пенза : ПГУ, 2015. 2 том. С. 153–154.
3. Мрачковський А.М. Дослідження електричної ерозії поверхонь різних контактних пар низьковольтних комутаційних апаратів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. № 242. С. 155–158.
4. Montgomery S., Kennedy D., O'Dowd N.: Analysis of Wear Models for Advanced Coated Materials. Matrib: International Conference on Materials, Tribology, Recycling, Lipanj, Croatia, June 24-26, 2009.
5. Kudish I.I., Covitch M.J. Modeling and Analytical Methods in Tribology. CRC Press, 2010. 925 p.
6. R. Holm "Electric contacts: theory and application / by Ragnar Holm with Else Holm; preface by J.B.P. Williamson", 4th ed. Berlin/London: Springer, 2011. 484 p.
7. Мышкин Н.К., Кончиц В.В. Электрические контакты. Долгопрудный : Интеллект, 2008. 560 с.

References:

1. Ishkov, A.S., Svetlov, A.V., Solodimova, G.A., & Torgashin, S.I. (2017). Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya rezistivnykh potentsiometrov s primeneniyem rastrovoy elektronnoy mikroskopii. *Izmereniye. Monitoring. Upravle-niye. Kontrol'*, no. 4(22), pp. 77–83.
2. Nedorezov, V.G., & Tsygankov, A.I. (2015). Vliyaniye produktov iznosa kontaktnoy pary potentsiometra na nadezhnost' yego raboty. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*, v 2 t. Penza: PGU, 2 tom, pp. 153–154.
3. Mrachkovskiy, A.M. (2016). Doslidzhennia elektrychnoi erozii poverkhon riznykh ko-ntaktnykh par nyzkovoltnykh komutatsiynykh aparativ. *Naukovyi visnyk Na-tsiyalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Se-riia: Tekhnika ta enerhetyka APK*, no. 242, pp. 155–158.
4. Montgomery, S., Kennedy, D., & O'Dowd, N. (2009). Analysis of Wear Models for Advanced Coated Materials. Matrib: International Conference on Materials, Tribology, Recycling, Lipanj, Croatia, June 24-26.
5. Kudish, I.I., & Covitch, M.J. (2010). Modeling and Analytical Methods in Tribology. CRC Press.
6. R. Holm (2011). Electric contacts: theory and application / by Ragnar Holm with Else Holm; preface by J.B.P. Williamson., 4th ed. Berlin/London: Springer.
7. Myshkin, N.K., & Konchits, V.V. (2008). Elektricheskiye kontakty. Dolgoprudnyy: Intellekt.