

БОНДАРЕНКО Б. М. – преподаватель (ДНУЗТ)

РАЗГОНОВ А. П. – д.т.н., профессор (ДНУЗТ)

ПРОФАТИЛОВ В. І. – к.т.н., доцент (ДНУЗТ)

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ РЕЛЕ

### Вступ та постановка задачі

На залізницях України в основному експлуатуються релейні системи автоматики, реалізовані на реле першого класу надійності типу НМШ або РЕЛ, що використовуються при побудові пристроїв, що забезпечують безпеку руху поїздів. Для забезпечення відповідності експлуатаційно-технічним вимогам реле залізничної автоматики періодично перевіряються й регулюються по всьому комплексу параметрів.

Згідно з регламентом перевірки контактів реле залізничної автоматики, електромеханік повинен переконатися у чистоті контактних поверхонь, тому як від цього при сумісному руху (ковзанні) контактів залежить сила тертя в усій рухливій системі реле. В існуючій технічній документації відсутні нормативи такої чистоти, тому електромеханік використовує свій досвід для діагностування чистоти контактних поверхонь, що не є об'єктивним показником. Тому для автоматизованого діагностування контактної системи і автоматизації визначення чистоти контактів необхідно визначитися з параметрами, які залежать від цієї чистоти. Перш за все це опір контактів, який при забрудненні контактів змінюється та легко визначається за допомогою автоматизованих вимірювань. Але відомо, що й брудні контакти можуть забезпечувати нормативний опір [1]. По друге, це струм притягання і відпускання якоря реле. Тому необхідні інші додаткові визначення чистоти контактів. Для визначення чистоти контактних поверхонь був запропонований спосіб визначення сил тертя у рухомій системі реле [2, 3].

Відомо, що для визначення тягової сили у момент початку руху якоря електромагні-

тного реле важливо знати величину сил тертя, що утримують систему в початковому положенні після подачі струму в обмотку реле.

Рівняння руху рухливої системи реле:

$$F_e = m_1 \frac{d^2 \delta}{dt^2} + f_{mp} \frac{d\delta}{dt} \pm c\delta + F_0, \quad (1)$$

де:  $m_1$  - приведена маса рухомих частин реле,  $\delta$  - переміщення якоря,  $f_{mp}$  - питома сила опору руху якоря і рухомих частин реле,  $c$  - приведена жорсткість контактних і поворотних пружин,  $F_0$  - початкове значення електромагнітної протидіючої сили,  $F_e$  - електромагнітна сила притягнення, що діє на якір.

Для наближеного вирішення цього нелінійного рівняння користуються графоаналітичним методом послідовних наближень. При цьому, як правило, нехтують початковою протидіючою силою ( $F_0$ ) і питоною силою опору руху  $f_{mp}$  [1]. Питому силу опору руху слід враховувати в розрахунках, оскільки за її величиною при функціональному контролі можна оцінити стан рухливих системи реле, у тому числі й контактних поверхонь елементів, що труться.

Проте існуючими технічними засобами доволі складно визначити відносно малу початкову величину механічної реакції якоря на струм в обмотці реле у момент зрушення якоря.

Аналіз формули (1) показує, що реакція якоря на струм в обмотці обумовлена як електромагнітними (струм, напруга, потоки) так і механічними параметрами реле.

Перед моментом зрушення швидкість руху якоря нульова, отже початковим значенням протидіючої сили  $F_0$  (протидіючої електрорушійної сили) можна нехтувати.

## Опис методу

До моменту зрушення якоря питома сила опору руху  $f_{mp}$  обумовлена наявністю на поверхні рухливих зв'язаних елементів сил зчеплення (якоря, контактів, регулювальних пружин та ін.), за рахунок тертя першого роду (тертя ковзання), яке в початковий момент максимально і є тертям спокою. Ця величина залежить від якості обробки поверхонь деталей, що труться, і від сили їх стискування (нормальної реакції):

$$f_{mp} = k \cdot N, \quad (2)$$

де:  $k$  - коефіцієнт тертя при ковзанні,  $N$  - величина нормальної реакції (сили стискування).

Сила тертя спокою дорівнює модулю і спрямована проти зовнішньої сили, що викликає ковзання однієї деталі по іншій.

Відомо, що коефіцієнт тертя ковзання  $k$  не є постійною величиною (як у спокої), він залежить від властивостей і стану поверхонь деталей.

Таким чином, стан поверхонь взаємодіючих деталей характеризується коефіцієнтом тертя при ковзанні  $k$ , у тому числі контактів реле, який значною мірою визначає величину сили тертя  $f_{mp}$  в рухливій системі.

З початком руху системи коефіцієнт тертя спокою переходить в коефіцієнт тертя ковзання, який дещо менше коефіцієнта тертя спокою і визначається формулою (2).

Із зростанням швидкості ковзання та із зміною тиску між контактами змінюється і величина коефіцієнта тертя ковзання. Умовно діапазон зміни цього коефіцієнта може бути прийнятий як номінальний для певних типів реле.

Визначивши різницю між коефіцієнтами тертя спокою і тертя ковзання отримуємо третю величину, що характеризує стан поверхонь тертя в рухливій системі. Діапазон зміни цієї величини також може бути визначений як номінальний.

Метою роботи є розробка методу вимірювання тягового зусилля з використанням механічного резонансу рухливої системи реле для оцінки коефіцієнта тертя ковзання.

Суть методу автоматизованого діагностування контактної системи реле полягає в тому, що система виводиться із стану рівноваги (спокою) шляхом використання властивості механічного резонансу рухливої системи реле. Це дозволяє автоматизованими засобами визначити момент зрушення і зупинки якоря, а також відповідні їм струм і силу тертя.

Якщо вирішувати цю задачу традиційним способом - шляхом вимірювання напруги на обмотці реле при зрушенні якоря, то необхідно разом з силами тертя спокою додатково визначити момент інерції якоря. Останній можна визначити експериментальним шляхом, якщо розташувати якорь на ножовій опорі так, щоб він гойдався як фізичний маятник.

Частота коливань такого маятника визначається по наступній формулі:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgl_u}{J}}. \quad (3)$$

Звідси момент інерції якоря:

$$J = \frac{mgl_u}{4\pi^2 f^2}, \quad (4)$$

де:  $m$  - інертна маса якоря,  $l_u$  - відстань від центру тяжіння якоря до осі обертання,  $g$  - прискорення сили тяжіння,  $f$  - число коливань якоря в секунду [2].

При рішенні задачі з використанням механічного резонансу рухливої системи, шляхом розгойдування її імпульсами струму, моментом інерції якоря можна нехтувати, оскільки через кожних півперіоду власних коливань знак моменту змінюється на протилежний, при незмінному його модулі. В результаті цього уся енергія, що подається в систему, витрачатиметься на подолання сил тертя першого роду (ковзання).

Визначення частоти власних коливань реле з рішення рівнянь (1-3) складно, по тій причині, що складно знайти істинні значення механічних параметрів (сили тертя якоря, контактів, пружності контактних пружин та ін.) тим більше, що значення деяких з них випадкові, тому запропоновано вирішити це завдання експериментальним

шляхом, використовуючи осцилограми вібрації якоря при вимиканні струму в обмотці реле (рис. 1), де  $T_e$  період вібрації якоря.

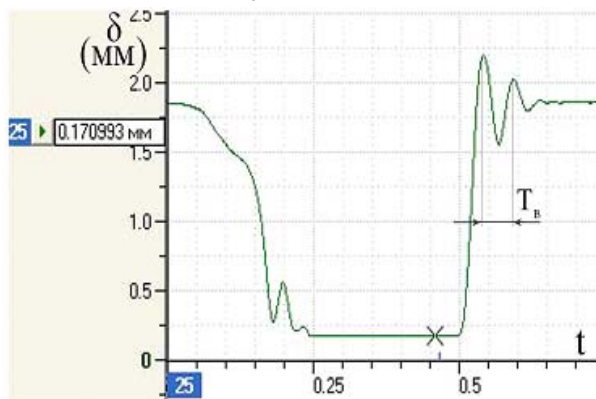


Рис. 1. Осцилограма для визначення власних коливань рухливої системи реле з вібрації якоря

На рис. 2 пояснюється метод діагностики рухливої системи реле. Імпульси напруги (струму) резонансної частоти подають в знеструмлену обмотку реле (рис. 2 а), що виводить рухливу систему реле із стану спокою. Потім, плавно зменшуючи амплітуду імпульсів, визначають значення струму в обмотці, при якому станеться повне згасання механічних коливань в системі (рис. 2 б). За початком і закінченням коливань якоря здійснюється стеження за допомогою оптичного каналу [3]. При шпаруватості імпульсів струму рівної двом, визначається середнє значення струму, при якому відбувається повна зупинка коливань системи. З набутих значень визначають різницю струмів.

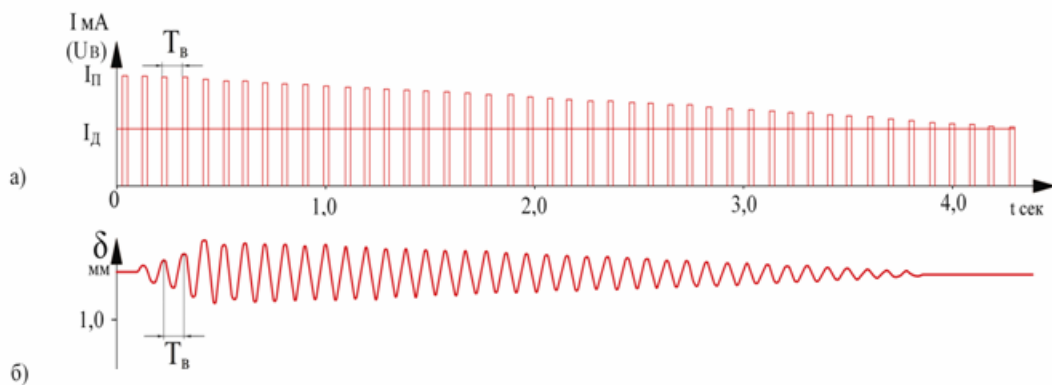


Рис. 2. Коливання якоря реле при поданні в обмотку імпульсів напруги (струму), що зменшуються по амплітуді, з частотою власних коливань рухливої системи

Визначаючи різницю в значенні сили струму, отриманої розглянутим методом і сили струму, отриманої при традиційному вимірюванні можна з достатньою мірою точності визначити величину сили тертя рухливої системи реле.

Використання властивостей механічного резонансу рухливої системи реле дозволяє

виміряти струми в обмотці реле, при яких рухлива система починає переміщення і закінчує його повною зупинкою якоря реле.

Аналогічним методом можуть бути отримані сили тертя в рухливій системі при відпаданні якоря реле (рис. 3).

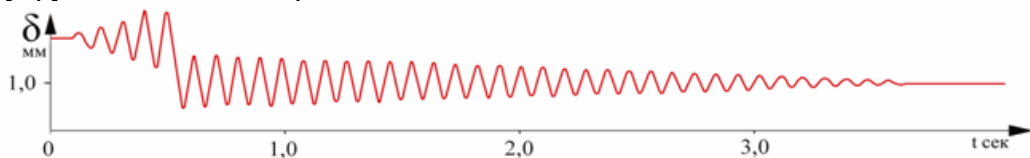


Рис. 3. Резонансні коливання якоря реле і фронтів груп контактів при поданні в обмотку імпульсів напруги (струму) номінальної амплітуди і частоти власних коливань рухливої системи

За результатами вимірів струмів можна судити про величину сил тертя рухливої системи в стані спокою і в стані руху (ковзання).

У загальному вигляді сила тяжіння (тяга) якоря електромагніту виражається наступною формулою

$$F_T = \frac{(Iw)^2 G_m^2}{2\mu_0 S} \quad (5)$$

де:  $I$  - струм в обмотці реле,  $G_m$  - загальна магнітна провідність реле,  $S$  - площа полюса сердечника,  $Iw$  - сила, що намагнічує, створювана обмоткою реле.

До моменту початку руху сила тяги порівнюється з питомою силою опору руху в рухливій системі:  $F_T = f_{mp}$ , причому, в цьому випадку  $f_{mp}$  виражає величину сили тертя спокою  $f_{мпп}$ , у тому числі й для тилових контактних груп, а, як видно з формули (5) визначається значенням струму спокою  $I_{п}$  в обмотці реле до моменту зрушення якоря.

До моменту зупинки рухливої системи реле  $f_{mp}$  виражає величину сили тертя руху  $f_{мпд}$  з урахуванням стану поверхонь тилових контактних груп. Струм, при якому рухлива система зупиняється  $I_{д}$  визначається за допомогою запропонованого методу і відрізняється від струму до моменту зрушення якоря.

В цьому випадку, до моменту зрушення якоря і зупинки реле отримуємо дві сили опору руху:

$$f_{мпп} = \frac{(I_{п}w)^2 G_m^2}{2\mu_0 S} \quad (6)$$

$$f_{мпд} = \frac{(I_{д}w)^2 G_m^2}{2\mu_0 S} \quad (7)$$

Для визначення стану поверхонь фронтних контактних груп, запропоновано збільшити амплітуду резонансних імпульсів струму до величини, при якій станеться зіткнення рухливих і фронтних контактів. При цьому повного притягання якоря не допускають. В цьому випадку, коливання рухливої системи відбуваються з урахуван-

ням тертя у фронтних контактних групах (рис. 3).

Тоді, сила тяжіння якоря у момент руху описується відомою формулою [1]:

$$F_T = - \frac{(Iw)^2 G_m^2}{2G_{\delta}^2} \cdot \frac{dG_{\delta}}{d\delta} \quad (8)$$

де:  $G_{\delta}$  - загальна магнітна провідність фізичного проміжку.

При цьому імпульсний струм в обмотці може характеризувати номінальну величину  $I_{нф}$ , при якій резонансні коливання відбуваються з урахуванням тертя у фронтних контактних групах. Тоді амплітуда зміни фізичного проміжку, при номінальному струмі резонансних коливань характеризуватиме  $f_{mp}$ , вже з урахуванням тертя у фронтних контактних групах  $f_{трф}$ , яка буде отримана з (8) шляхом підстановки значення  $I_{нф}$ .

Дослідження показують, що зміна сил тертя в рухливій системі в діапазоні 14-20 гс більшою мірою пов'язана із зміною якості поверхні контактних груп, чим із зміною якості поверхонь, що труться, в інших місцях цієї рухливої системи (робоча тяга, ярмо, регулювальні пружини і так далі).

Ця зміна обумовлена інтенсивнішим зносом контактів під впливом механічних, хімічних або електричних чинників. Абразивні частки, що утворюються при цьому, оксиди хімічної корозії та електрична ерозія прискорюють деформацію поверхонь ковзання контактів.

Окрім того, дослідження показують, що зміна амплітуди і частоти власних механічних коливань рухливої системи також пов'язана із змінами сил тертя між зв'язаними деталями. Ці зміни легко визначаються з амплітуди, частоти і кількості власних коливань системи (періодів вібрації  $T_e$ ) при відпаданні якоря (див. рис. 1).

Таким чином, по змінах сил тертя в рухливій системі, що відбуваються в процесі експлуатації можна судити про якість контактних поверхонь і про загальний стан рухливої системи.

Дослідженнями встановлено, що інформативним методом визначення чистоти по-

верхні окремих контактних груп є вимірювання зміни перехідного опору контактів під час їх сумісного руху (ковзання) за чотириохпровідною схемою, при малих струмах за допомогою блоку вводу аналогового сигналу в персональний комп'ютер на базі аналого-цифрового пристрою. Ці дослідження показують, що при вимірюванні опору контактів під час їх сумісного руху, ланцюги провідності на поверхні ковзання створюються і розриваються в залежності від чистоти контактів, чим чистіше контакт тим більша кількість крапок провідності виникає і триваліше існує (рис. 4). Це підтверджує теорію залежності стабільності контакту від чистоти контактних поверхонь [1].

Збільшення опору чистих металевих контактів унаслідок викривлення і стягування ліній струму до провідної плями називається опором стягування. Опір стягування контакту виражається формулою [4]:

$$R_c = \frac{\rho}{2a}, \quad (9)$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріалу контактів, Ом-см;  $a$  — радіус провідної контактної площі (плями), в см (або еквівалентний радіус сумарної площі декількох контактних плям).

У разі коли обидва контакти однієї контактної пари виготовлені з різних матеріалів,

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a}, \quad (10)$$

де  $\rho_1$  і  $\rho_2$  - питомі опори матеріалів обох контактів пари. При замиканні контактів спостерігається як пружна, так і пластична деформація матеріалу в контактних площах (плямах).

У разі багатоточкового контакту, перехідний опір є паралельним з'єднанням опорів стягування кожної контактної плями які утворюються не тільки у місці комутації але і у роз'ємах та у місці приєднання вимірювача. Тому для точнішого вимірювання опору стягування комутаційних контактів важливим є забезпечення надійного контакту у інших вище перелічених місцях.

Вважаючи середнє питома натиснення на контактному майданчику рівним контак-

тній твердості матеріалу, можна написати [5]

$$F_k = H\pi a^2 \quad (11)$$

де  $F_k$  – контактне натиснення,  $H$  - контактна твердість матеріалу, яка приблизно в три рази більше натиснення, відповідного початку пластичної деформації (величина контактної твердості мало відрізняється від твердості по Бринеллю і Віккерсу). Для срібних контактів:  $H = 220 - 350 \frac{H}{\text{мм}^2}$  [5].

З урахуванням радіусу провідної контактної площі для контактів з різних матеріалів контактне натиснення можна записати:

$$F_k = H\pi \left( \frac{\rho_1 + \rho_2}{4R_c} \right)^2 \quad (12)$$

Формула (12) використовується для автоматизації процесу вимірювання контактного тиску сумісно з методами запропонованими у [6] для усунення похибки вимірювання. Нестабільність отриманих результатів вимірювання перехідного опору контактів може бути наслідком їх забруднення, яке необхідно діагностувати.

Якщо плавно збільшувати напругу на контактах, то при деякій величині напруги опір плівки раптом зникає (плівка як би пробивається). Це явище називається фрітінгом - початковою стадією пробою плівки [6]. При падінні напруги на контактах до величини 0,35 - 1,1 В, відповідної напрузі плавлення матеріалу хоча б одного з контактів, має місце  $\alpha$ -фрітінг. В цьому випадку матеріал контакту плавиться і втягується електростатичними силами в канал пробою плівки, утворюючи провідний перешийок (місток) між контактами [6]. Якщо при фрітінгу плівок потужність джерела струму мала і падіння напруги на контактах недостатньо для розплавлення матеріалу одного або обох контактів (0,1 - 0,35 В), то має місце  $\beta$ -фрітінг. В цьому випадку органічна плівка в точці пробою обвуглюється (утворюються частинки вуглецю) і її опір знижується на декілька порядків (до сотень тисяч омів).

$\beta$ -фрітінг запропоновано використовувати для визначення чистоти контактних по-

верхонь від вуглецевих забруднень у числовій формі.

Для ілюстрації методу визначення величини забруднення контактів для декількох контактних пар було зроблено по декілька вимірювань перехідного опору під час їх сумісного ковзання. На рис. 4 представлено по три вимірювання для двох контактних пар 21-22 (рис. 4, а) і 41-42 (рис. 4, б). Контактна пара 21-22 (рис. 4, а) має більш стабільний показник контакту під час ковзання (менше зникнень вимірювальної напруги), ці значення практично повторюються при кожному з трьох вимірювань, для кожної контактної пари. При визначенні стабільності контакту усі рівні напруги заповнюються тактовою частотою процесора вимірювача, ті значення, які перевищили поріг приймаються за «лог.1» решта - за «лог.0». Співвідношення числа нулів до одиниць є показником забруднення. Якщо цей показник рівний «лог.1», це означає 50 % зникнення контакту під час ковзання, чим менше цей показник – тим чистіше контакт. Дослідження показують, що для фронткових контактів реле НМШ і РЕЛ цей показник має бути більше 0,8 (рис. 4), а для тилових контактів більше чим 0,1. Це пояснюється матеріалом контактної пари, так як для тилових контактів це срібло-срібло.

### Висновки

Важливою перевагою запропонованого методу вимірювання тягового зусилля з використанням механічного резонансу рухливої системи реле для оцінки коефіцієнта тертя ковзання є можливість автоматизації процесу діагностики контактних груп.

Використання цього методу можливо при коливаннях якоря і брязкоту контактів, тобто під час всього руху якоря, при спрацюванні і відпаданні, співвідношення фіксуються з появою контакту і до повної зу-

пинки якоря та повністю характеризують стан забруднення контактної групи. Цей показник також залежить від контактного тиску та характеризує товщину матеріалу контакту, тобто при його зменшенні від встановленого значення (наприклад для реле типу НМШ і РЕЛ – 0,8 і 0,1 – для фронткових і тилових контактів відповідно) реле у будь-якому разі потребує ремонту по однієї з вищезгаданих причин.

### Бібліографічний список

1. Витенберг, М. В. Расчет электромагнитных реле [Текст] / М. В. Витенберг. – М.: Энергия, 1975. – 416 с.
2. Разгонов, А. П. К оценке сил трения в моменты трогания и останковки якоря реле [Текст] / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – № 14. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – С. 12-15.
3. Разгонов, А. П. Декларацийний патент на корисну модель [Текст] / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый // № 11179 від 15.12.2005 р. – Бюл. № 12 «Спосіб діагностики роботи контактних груп багатоконтактного реле».
4. Руководство по эксплуатации [Текст] (ЗПБ.418.002 РЭ).
5. Dengel, D.: Wichtige Gesichtspunkte fur die Hartemessung nach Vickers und nach Knoop im Bereich der Kleinlast - und Mikrohart, Z.f. Werkstofftechnik 4 (1973). – P. 292-298.
6. Keefer, H. J., Gumley K. H. Relay Contact Behaviour under Non Eroding Circuit Conditions [Text] / H. J. Keefer, K. H. Gumley – N. Y., BSTJ/ – 1958. – № 3. – P. 777—814.

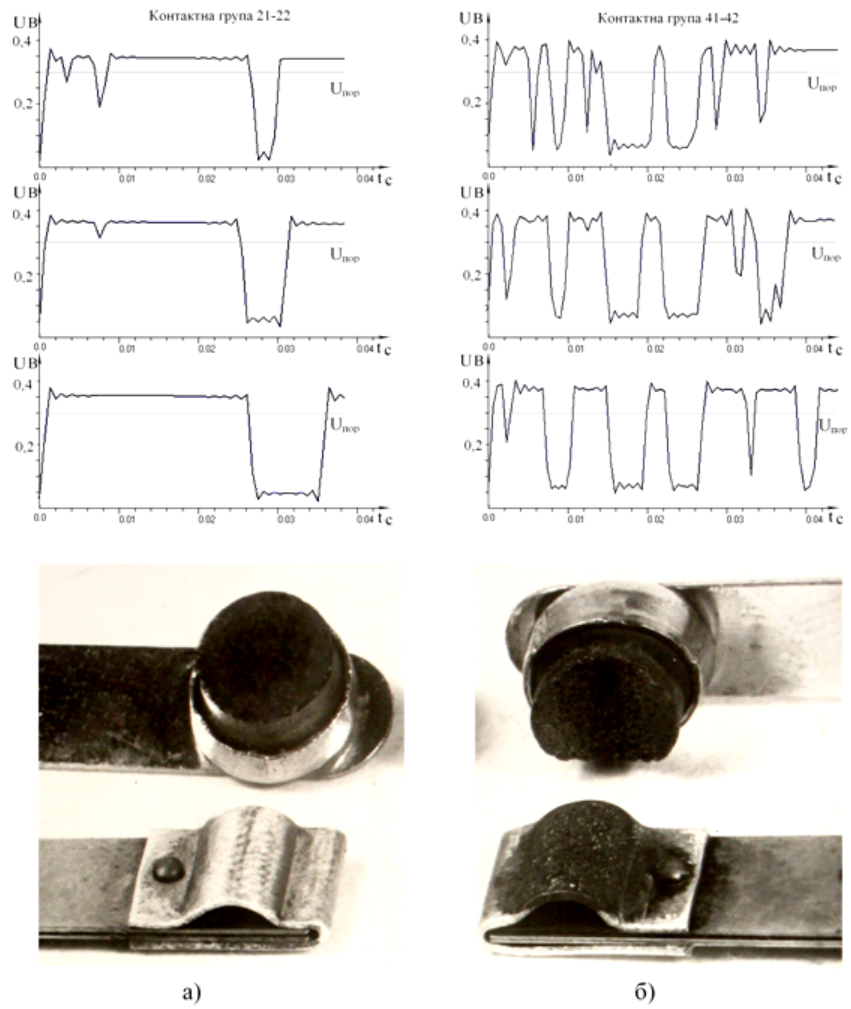


Рис. 4. Зміна перехідного опору контактів під час їх сумісного руху (ковзання): а) чистих контактів, б) забруднених контактів