

## **Повышение надежности электрических контактов, как важный элемент энергетической безопасности**

Н. Н. Дзекцер, Г. Ю. Авраменко, А. В. Романова, Е. С. Рублева,  
В. В. Измайлов\*, М. В. Новоселова\*

ООО "Системы энергоэкологической безопасности",  
Санкт-Петербург, РФ, e-mail: [ees@sp.ru](mailto:ees@sp.ru)

\*Государственный технический университет, Тверь, РФ,  
e-mail: [iz2v@tvcom.ru](mailto:iz2v@tvcom.ru)

*Надежность электрических контактных соединений во многом определяет работоспособность и пожаробезопасность электроустановок. На основе математической модели процесса деградации контактного соединения получены зависимости роста его электрического сопротивления во времени. С учетом этих зависимостей выполнен прогноз ресурса разборных и неразборных электроконтактных соединений. Указано оптимальное направление усовершенствования контактных соединений, прежде всего, алюминиевых проводников: применение электропроводящей смазки.*

**Ключевые слова:** надежность контактных соединений, микрогеометрия поверхности, прогнозирование ресурса, математическая модель, электропроводящая смазка.

Известно, что энергетическая безопасность государства основана на ресурсной достаточности, экономической доступности, экологической допустимости и технологической осуществимости сбалансированного обеспечения спроса и предложения топливно-энергетических ресурсов. Энергетическая безопасность включает:

- обеспечение надежного энергоснабжения;
- обеспечение надежности, пожаробезопасности энергоустановок;
- обеспечение эффективности энергоиспользования;
- охрану окружающей среды.

Обеспечение энергетической безопасности предполагает:

выявление состава и остроты угроз энергетической безопасности в настоящее время и на прогнозируемый период; создание правовых основ и экономических механизмов обеспечения энергетической безопасности, включая вопросы разработки единого порядка и методологии ценового (тарифного) регулирования; оценку количественными показателями (индикаторами) существующего и ожидаемого уровней энергетической безопасности и степени защищенности энергетических интересов; разработку технологий обеспечения энергетической безопасности; формирование схемы управления энергетической безопасностью.

Надежность электрооборудования определяется надежностью его составных элементов. Среди них важное место занимают электрические контактные соединения, число которых в десятки и сотни раз превосходит число единиц оборудования энергетических установок.

© Н. Н. Дзекцер, Г. Ю. Авраменко, А. В. Романова, Е. С. Рублева,

В. В. Измайлов, М. В. Новоселова, 2014С точки зрения теории надежности неразборные и разборные электроконтактные соединения можно отнести к изделиям с деградационными отказами, обусловленными постепенным изменением ресурсного параметра — электрического сопротивления контактного соединения или его температуры. Воздействия множества трудно контролируемых факторов, таких как параметры окружающей среды, состояние контактирующих поверхностей, режимы

работы и т. п., инициируют деградационные процессы непосредственно в области контакта между поверхностями, что ведет к увеличению переходного сопротивления и температуры контакта. В значительной мере деградация соединения определяется закономерностями роста оксидных и иных непроводящих пленок на площадках фактического контакта рабочих поверхностей контакт-деталей [1, 2].

Электрический контакт двух деталей представляет собой совокупность дискретных пятен контакта, образованных соприкасающимися неровностями поверхности. На поверхности единичного пятна контакта за счет диффузии оксиданта вдоль границы контакта происходит рост поверхностной непроводящей пленки [2].

Известно, что очень тонкие диэлектрические пленки вследствие туннельного эффекта оказывают малое сопротивление прохождению электрического тока, то есть при некоторой толщине пленки  $\delta \leq \delta_c$  контакт можно считать квазиметаллическим (рис. 1). Поскольку с ростом толщины пленки сопротивление очень быстро увеличивается, будем считать пленку при  $\delta > \delta_c$  практически непроводящей.

Зависимость толщины пленки от времени, согласно предлагаемой авторами модели деградации единичного пятна контакта, описывается уравнением

$$\delta = \delta_m \left[ 1 - 2 \sum_1^{\infty} \frac{1}{\alpha_n} \cdot \frac{J_0(\alpha_n r/a)}{J_1(\alpha_n)} \exp\left(-\frac{D\alpha_n^2 t}{a^2}\right) \right], \quad (1)$$

где  $\delta_m$  — толщина пленки на свободной поверхности за пределами единичной площадки контакта;  $r$  — текущее значение радиуса;  $a$  — радиус единичной площадки контакта;  $D$  — коэффициент диффузии оксиданта в межконтактный зазор;  $t$  — время;  $\alpha_n$  — корни функции Бесселя;  $J_0$  и  $J_1$  — функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно.

Из уравнения (1) невозможно аналитически выразить зависимость радиуса квазиметаллического пятна контакта от времени. В результате численного решения уравнения (1) относительно значений  $r(t)$  при  $\delta = \delta_c$  и последующей аппроксимации результатов получена зависимость радиуса квазиметаллического пятна от времени  $r(t)$  в виде

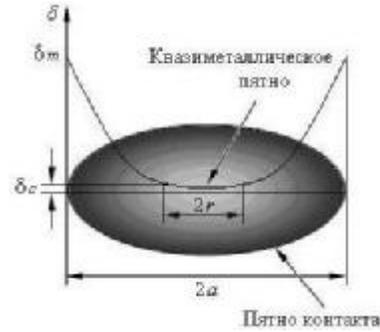


Рис. 1. Схема единичного пятна контакта.

$$r(t) = a \left[ 1 - 0,77 \left( \frac{K_8 D}{a^2} t \right)^{0,5} - 0,23 \left( \frac{K_8 D}{a^2} t \right)^6 \right], \quad (2)$$

где  $K_8 = [1 - 4,5 \ln(\delta_c / \delta_m)]$  — коэффициент аппроксимации;  $\delta_c$  — толщина пленки на границе квазиметаллического участка. Численное решение уравнения (1) осуществлялось для значений  $\delta_c / \delta_m = 0,01—0,10$ , представляющих практический интерес. На рис. 2 приведены результаты численного решения уравнения (1) и аппроксимирующей зависимости (2).

Следуя Р. Хольму [3] и считая, что проводимость контакта определяется в основном проводимостью квазиметаллического участка, получаем на основании уравнения (2) зависимость сопротивления от времени  $R1(t)$  для единичного пятна контакта

$$R1(t) = \frac{\rho}{2r(t)} = \frac{R_0}{1 - 0,77(t/t_m)^{0,5} - 0,23(t/t_m)^6}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала контакт-детали;  $R_0 = \rho/2a$  — начальное сопротивление пятна контакта;  $t_m = a^2 / (K_8 D)$  — "время жизни" единичного пятна контакта: при  $t \rightarrow t_m$  сопротивление единичного контакта  $R1(t) \rightarrow \infty$ .

Реальный контакт всегда состоит из нескольких проводящих пятен, поэтому зависимость (3) обобщена для множественного контакта [2]. Зависимость от времени электросопротивления контакта с равномерно распределенными по размерам пятнами имеет вид

$$R(t) = \frac{R1(t)}{1 - (t/t_m)^{0,5}}. \quad (4)$$

Величина  $t_m$  рассчитывается по радиусу максимального по размеру пятна контакта.

На практике за критерий параметрического отказа электроконтактного соединения принимают возрастание его сопротивления  $R$  либо до некоторого максимально допустимого абсолютного значения  $R_l$ , либо до некоторого максимально допустимого относительного значения  $k_l = R_l / R_0$  по сравнению с начальным значением  $R_0$ . Ввиду большей наглядности в методике используется второй критерий предельного состояния. Тогда решение уравнений (3) и (4) относительно времени при заданном допустимом значении величины  $k_l$  позволяет получить оценку ресурса контакта. В результате аппроксимации численного решения данных уравнений получено выражение общего вида для ресурса  $t_l$  единичного и множественного контактов

$$t_l = t_m \left( 1 - k_l^{-\alpha} \right)^{\beta}, \quad (5)$$

$R(t)/R_0$ .

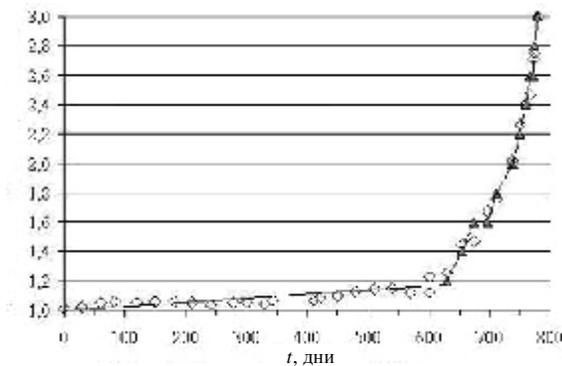


Рис. 2. Относительный рост электрического сопротивления пленки со временем:  $\diamond$  — эксперимент; — — линейный тренд;  $\blacktriangle$  — прогнозирование.

где для единичного контакта  $\alpha = 1,7$ ,  $\beta = 2,5$ ; для равномерного распределения пятен контакта по размерам  $\alpha = 0,6$ ,  $\beta = 2$ .

Формула (5) позволяет прогнозировать остаточный ресурс контактного соединения. Анализ показал, что предложенная модель оценки ресурса контактного соединения адекватно описывает техническое состояние контактов в интервале роста сопротивления от  $k = 1$ —3. Так, для  $k = 1,2$  это 630 дней, для  $k = 1,5$  — 670 дней, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

При монтаже новых соединений или при достижении контактными соединениями температур или сопротивлений, регламентированных ГОСТ 10434, рекомендуется применять электропроводящую смазку ЭПС-98. Смазка ЭПС-98 представляет собой смесь масла (силиконовое, полиэфирное или минеральное), высокодисперсного металлического порошка (медь или никель), присадки в виде неорганической тиксотропной добавки и стабилизирующих компонентов. Применение металлического порошка увеличивает фактическую площадь касания и повышает термостойкость смазки. В качестве стабилизирующих добавок смазка содержит антиоксиданты и/или ингибиторы коррозии. Наличие в электропроводящей смазке неорганической тиксотропной добавки позволяет регулировать ее вязкость, добиваясь получения оптимальной тягучести. При использовании смазки ЭПС-98 нет необходимости применять другие дефицитные и дорогостоящие средства стабилизации электрического сопротивления: медно-алюминиевых переходных деталей, тарельчатых пружин, металлопокрытий контактирующих поверхностей и т. д.

Систематический контроль температуры нагрева (или электрического сопротивления) контактных соединений в сочетании с применением электропроводящей смазки ЭПС-98 обеспечивает требуемую пожаробезопасность, надежность и экономичность контактов.

1. *Braunovic M.* Evaluation of the life-time of permanent electrical contacts / M. Braunovic, V. V. Izmailov, M. V. Novoselova // The 23rd Internat. conf. on Electrical Contacts: ICEC 2006, Sendai, Japan. — 2006. — P. 45—50.
2. *Braunovic M.* A model for life time evaluation of closed electrical contacts / M. Braunovic, V. V. Izmailov, M. V. Novoselova // Proc. of the 51 IEEE Holm conf. on Electrical Contacts, Chicago, Sept. 2005. — P. 217—223.
3. *Holm R.* Electric contacts. Theory and application. — Springer-Verlag, 1967. — 484 p.

## **Підвищення надійності електричних контактів, як важливий елемент енергетичної безпеки**

Н. Н. Дзекцер, Г. Ю. Авраменко, Я. В. Романова, Е. С. Рубльова,  
В. В. Ізмайлов, М. В. Новосьолова

*Надійність електричних контактних з'єднань багато в чому визначає працездатність та пожежну безпеку електрообладнання. На основі математичної моделі процесу деградації контактного з'єднання одержано залежності підвищення його електричного опору в часі. З урахуванням цих залежностей спрогнозовано ресурс розбірних і нерозбірних електроконтактних з'єднань. Вказано оптимальний напрямок удосконалення контактних з'єднань, перш за все, алюмінієвих провідників: застосування електропровідних мастил.*

**Ключові слова:** надійність контактних з'єднань, мікрогеометрія поверхні, прогнозування ресурсу, математична модель, електропровідне мастило.

## **Improvement reliability of electrical contact connections as important part of energetic security**

N. N. Dzektsler, G. U. Avramenko, A. V. Romanova, E. S. Rubleva,  
V. V. Ismailov, M. V. Novoselova

*Reliability of electrical contact connections considerably determines working capacity and fire-safety of electrical installations. The mathematical model of the degradation process in electrical contact is used for the analytic description of the time dependences of electrical contact resistance. The procedure of the life forecasting for separable and nonseparable electrical contacts has been developed on the base of the above dependences. Basing on consideration of physico-mechanical properties and microgeometry of contact-details surfaces main trends of contact connections improvement, first and foremost, aluminum conductors, are specified: application of electroconductive lubricant.*

**Keywords:** reliability of contact connections, microgeometry of surfaces, life forecasting, mathematical model, electroconductive lubricant.