

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.3.04

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА К ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В., 2022

Приведены результаты исследования фрикционных и электрических характеристик щеточно-коллекторного узла электродвигателей при температурах до 200 °С. Показана возможность применения обобщенной функции желательности Харрингтона в качестве интегрального показателя качества электрощеточных композиционных материалов. Рассчитана обобщенная функция желательности для электрощеточных материалов на основе меди с учетом основных эксплуатационных характеристик контакта: коэффициента трения, линейной интенсивности изнашивания щетки и коллектора в паре со щеткой из данного материала, переходного падения напряжения. Функция желательности является универсальным безразмерным критерием, не зависящим от размерности входящих в него величин. По наибольшему значению функции желательности выделен образец с оптимальным комплексом эксплуатационных свойств. Наилучшим сочетанием эксплуатационных характеристик обладает материал следующего состава: 40 % – медь; 20 % – графит; 40 % – дисульфид молибдена.

Ключевые слова: щетка, коллектор, трение, изнашивание, электрическое сопротивление, высокие температуры, материалы, функция желательности.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-2-5-11

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности и эффективности современного оборудования невозможно без обеспечения соответствующих характеристик различного рода электрических контактов, присутствующих в большинстве технических устройств. При этом нельзя обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики электроконтактных соединений без выбора оптимальных материалов контактирующих деталей. Поскольку большинство электроконтактных соединений одновременно являются элементом электрической цепи и фрикционной парой, материалы контактирующих деталей должны обладать сочетанием высоких электрических и фрикционных характеристик, которые должны сохраняться в конкретных (иногда весьма жестких) условиях эксплуатации соединения [1, 2].

Выбор оптимального материала деталей электроконтактного соединения осложняется тем, что в одном материале необходимо обеспечить сочетание противоречивых, порой антагонистических характеристик, когда изменение одного свойства в желаемом направлении приводит к изменению другого свойства в обратном

направлении. Возможности монокомпонентных материалов и традиционных сплавов как материалов электрофрикционных пар практически исчерпаны, поэтому основным направлением электрофрикционного материаловедения является разработка композиционных материалов для конкретных условий эксплуатации изделия. При этом непростой задачей остается выбор оптимального сочетания компонентов такого композиционного материала, обеспечивающего требуемый уровень электрических и фрикционных характеристик. Одним из инструментов для решения этой оптимизационной задачи является так называемая функция желательности, предложенная Е. Харрингтоном (Е. Harrington) [3]. Функция желательности Харрингтона успешно применяется при решении оптимизационных задач в различных научных исследованиях [4–10]. Например, в статье [4] эта функция использована для выбора оптимального материала разрывных электроконтактных соединений.

В настоящей работе на примере выбора материалов для скользящего электрического контакта «щетка – коллектор» показана методика применения функции желательности.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Частная функция желательности имеет вид

$$d = \exp[-\exp(-y')], \quad (1)$$

где d – количественная оценка желательности; y' – преобразованные безразмерные значения частных показателей.

Для преобразования абсолютных значений показателей в безразмерные значения по шкале желательности обычно используется линейное преобразование

$$y' = b_0 + b_1 y, \quad (2)$$

где y – абсолютное значение показателя; b_0 и b_1 – коэффициенты. Значения коэффициентов b_0 и b_1 определяются на основании решения системы двух линейных уравнений (2), записанных для двух абсолютных значений соответствующего показателя y согласно рекомендациям работы [3].

Обобщенная функция желательности рассчитывается на основании частных функций d_i

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}.$$

Оптимальному сочетанию параметров материала соответствует максимальное значение обобщенной функции желательности.

ОБРАЗЦЫ И УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

В качестве материала электрощеток были выбраны ВТ5 (электрографит + MoS_2); МГМ1 (медь – 40 %, графит – 20 %, MoS_2 – 40 %); МГ16 (графит – 16 %, остальное – медь) и МГ21 (графит – 21 %, остальное – медь). В качестве контртела в паре трения со щеткой из исследуемого материала использовали короткозамкнутый коллектор из кадмиевой бронзы БрКд1 (0,9...1,2 % Cd, остальное – медь). Этот материал обладает хорошей проводимостью (порядка 80 % проводимости меди) и достаточно высокой твердостью и рекомендуется для изготовления коллекторов электродвигателей.

Режимы испытаний:

температура в термокамере 20...200 °С;

плотность тока 0...200 кА/м²;

номинальное давление в контакте «щетка – коллектор» 30...110 кПа;

скорость относительного скольжения в контакте 2,5...22 м/с.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента приведены в статье [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Эксперименты показали существенное влияние скорости относительного скольжения на характеристики скользящего контакта «щетка – коллектор». Для примера на рис. 1 представлены зависимости переходного падения напряжения ΔU и коэффициента трения f от скорости относительного скольжения V в паре трения «щетка МГ16 – коллектор БрКд1» при плотности тока через контакт 10 кА/м² и контактном давлении 30 кПа. Аналогичный характер зависимостей $f(V)$ и $\Delta U(V)$ показали другие испытанные контактные пары.

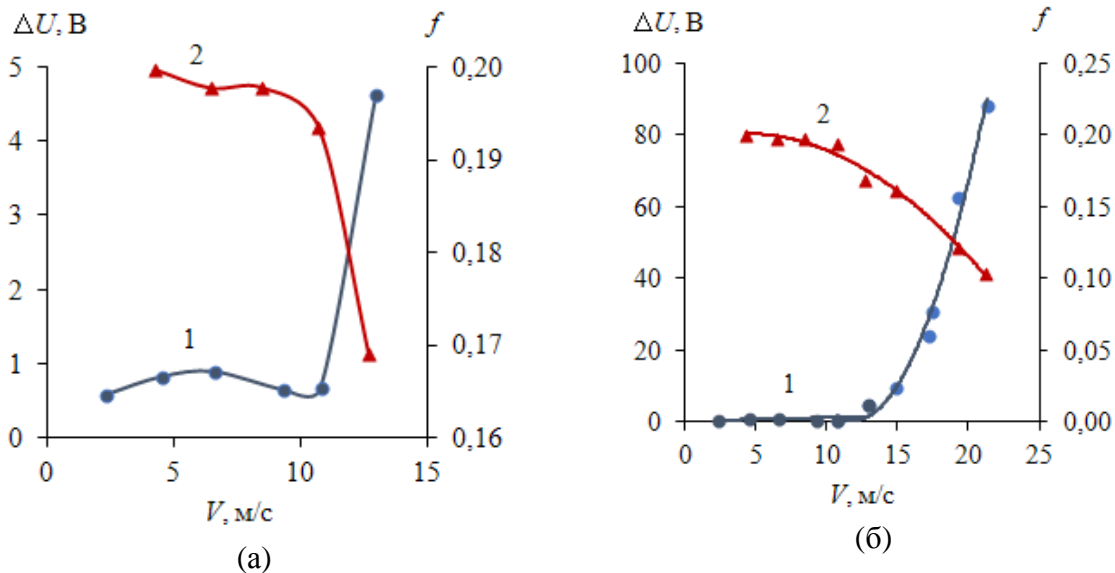


Рис. 1. Зависимость характеристик скользящего контакта от скорости относительного скольжения поверхностей: при малых скоростях (а); во всем исследованном диапазоне скоростей (б); 1 – падение напряжения ΔU ; 2 – коэффициент трения

При малых скоростях скольжения коэффициент трения имеет значение порядка 0,2, что характерно для подобных контактных пар [1, 2, 12]. При скоростях относительного скольжения $V > 10$ м/с наблюдается снижение величины коэффициента трения до значения порядка 0,1 при скорости $V = 22$ м/с.

Линейная интенсивность изнашивания исследованных щеточных материалов имеет значение порядка 10^{-9} , что также сравнимо с интенсивностью изнашивания типичных щеточных материалов [2, 12]. Линейная интенсивность изнашивания коллектора из БрКд1 – порядка 10^{-10} . По износостойкости испытанные электрощеточные материалы относятся к 8–9-м классам, т. е. их износостойкость немного выше средней (наибольшей износостойкости соответствует 12-й класс, наименьшей – 3-й).

Переходное падение напряжения при малых скоростях относительного скольжения $\Delta U < 1$ В, при этом типичный диапазон для наиболее распространенных электрощеточных материалов $0,5 < \Delta U < 2$ В [1]. Однако при скоростях относительного скольжения $V > 10$ м/с переходное падение напряжения резко увеличивается до значений порядка нескольких десятков вольт.

Наиболее вероятная причина такого резкого увеличения переходного падения напряжения – биение коллектора. Несмотря на то, что перед экспериментами коллектор протачивали на специальной оправке в токарном станке, а затем щетки прирабатывали специальным притиром, установленным вместо коллектора, полностью устранить биение коллектора не удалось. При больших скоростях скольжения наблюдается повышенное искрение в контакте, особенно для щеток ВТ5.

Поскольку ни один из испытанных электрощеточных материалов не обладает явно выраженными преимуществами, для выбора оптимального материала решено было использовать функцию желательности.

Частные функции желательности рассчитывались по формуле (1) для четырех показателей y (рис. 2). Значения частной функции желательности принято относить к одному из пяти диапазонов, характеризующих оценку показателей [3]: V – отлично (допустимый и очень хороший уровень); IV – хорошо (допустимый и хороший); III – удовлетворительно (допустимый и достаточный); II – плохо (недопустимый); I – очень плохо (неприемлемый) (рис. 2г).

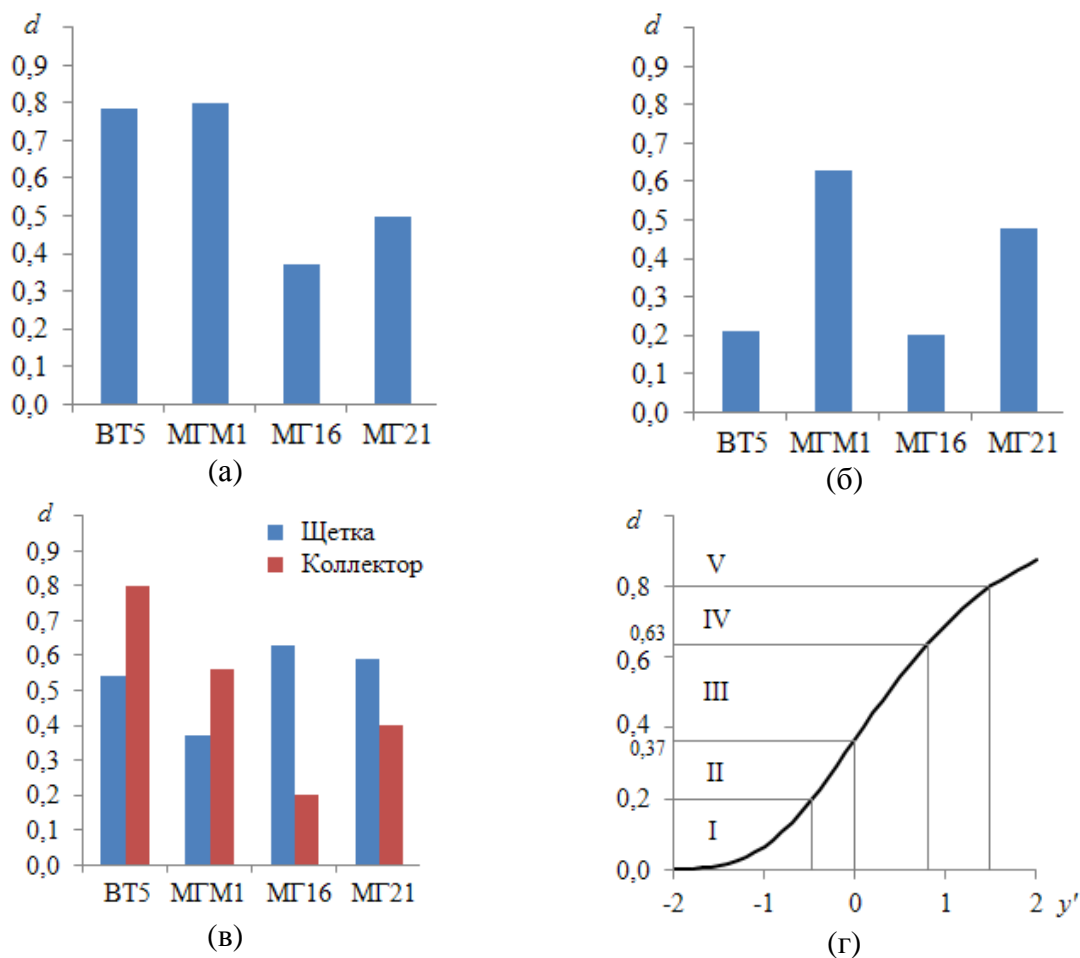


Рис. 2. Значения частной функции желательности: коэффициент трения (а); переходное падение напряжения (б); линейные интенсивности изнашивания (в); границы диапазонов (г)

Наибольшее значение обобщенной функции желательности имеет электрощеточный материал МГМ1, содержащий дисульфид молибдена в качестве твердосмазочного компонента:

Материал щетки	ВТ5	МГМ1	МГ16	МГ21
Обобщенная функция желательности	0,52	0,57	0,31	0,49

Приведенные значения обобщенных функций желательности свидетельствуют о том, что возможности повышения качества электрощеточного материала для исследованных контактных соединений еще не исчерпаны. Наибольшее значение среди исследованных материалов ($D = 0,57$) далеко от нижней границы диапазона «отлично» ($D = 0,8$). В этом случае анализ частных функций желательности позволяет выбрать показатель (параметр) материала, изменением которого в нужном направлении можно наиболее эффективно повысить значение обобщенной функции желательности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты, результаты которых представлены в статье, подтвердили необходимость поиска компромиссного варианта при выборе оптимального материала для скользящего электрического контакта «щетка – коллектор». При этом выбор материала коллектора практически ограничен электротехнической медью и ее низколегированными сплавами типа бериллиевой или кадмиевой бронзы и т. п. В то же время применение композиционных материалов на медной основе с введением смазывающих компонентов предоставляет широкий выбор вариантов электрощеточных материалов. Чтобы решить оптимизационную задачу по выбору оптимального электрощеточного материала для конкретных условий эксплуатации, с успехом можно применять так называемую функцию желательности Харрингтона. Пример подобного использования функции желательности приведен в статье. К достоинствам функции желательности в данном контексте относится возможность включения дополнительных показателей (параметров) электрощеточного материала, влияющих на работоспособность щеточно-коллекторного узла. Такими параметрами могут быть, например, удельная электро- и теплопроводность материала, его твердость, при необходимости стоимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.
2. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts: Fundamentals, Applications and Technology. CRC Press. 2007. 646 p.
3. Ахназарова С.Л., Гордеев Л.С. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии: учебно-метод. пособие. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2003. 76 с.
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Интегральная оценка электроконтактных свойств композиционных материалов с использованием функции желательности Харрингтона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 14–22.
5. Коротков В.М. Оптимизация состава электропроводящей смазочной композиции для эксплуатационного применения в коллекторно-щеточном узле

тягового электрического двигателя // *Computational nanotechnology*. 2019. Т. 6. № 2. С. 16–20.

6. Pal S., Gauri S.K. A desirability functions-based approach for simultaneous optimization of quantitative and ordinal response variables in industrial processes // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2018. V. 10. № 1. P. 76–87.

7. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Интегральная оценка загрязнения ландшафта с использованием функции желательности Харрингтона // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2014. № 4. С. 101–113.

8. Любушин Н.П., Брикач Г.Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // *Экономический анализ: теория и практика*. 2014. № 18 (370). С. 2–10.

9. Харитонов Е.А., Михайлов О.В. Функция желательности и возможности ее применения для оценки научной деятельности в национальных исследовательских университетах // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19. № 14. С. 142–145.

10. Королева С.В. Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологическом эксперименте // *Современные проблемы науки и образования*. 2011. № 6. С. 71.

11. Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Экспериментальная установка для исследования скользящего контакта «щетка – коллектор» при высоких температурах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 1 (13). С. 14–21.

12. *Electrical Contacts: Principles and Applications*. Ed. by P.G. Slade. CRC Press. 2014. 1210 p.

Для цитирования: Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В. Применение функции желательности Харрингтона к выбору материалов для скользящего электрического контакта // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 5–11.

HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION APPLICATION TO THE SELECTION OF MATERIALS FOR SLIDING ELECTRICAL CONTACT

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.F. GUSEV, Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

The results of a study of the frictional and electrical characteristics of the brush-collector unit of electric motors at temperatures up to 200 °C are presented. The possibility of using the generalized Harrington desirability function as an integral indicator of the quality of electrical brush composite materials is shown. The generalized desirability function for copper-based electrical brush materials is calculated, taking into account the main operational characteristics of the contact: the friction coefficient, the linear wear rate of the brush and collector paired with a brush made of a given material, and the transient voltage drop. The desirability function is a universal dimensionless criterion that does not depend on the dimensions of the quantities included in it. According to the highest value of the desirability function, a sample with an optimal set of operational properties was selected. The best

combination of operational characteristics is possessed by a material with a composition of 40 % – copper; 20 % – graphite; 40 % – molybdenum disulfide.

Keywords: brush, collector, friction, wear, electrical resistance, high temperatures, materials, desirability function.

REFERENCES

1. Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M. Elektricheskiye kontakty [Electrical contacts]. Dolgoprudnyy: Intellekt. 2008. 560 p.
2. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts: Fundamentals, Applications and Technology. CRC Press. 2007. 646 p.
3. Akhnazarova S.L., Gordeev L.S. Ispolzovaniye funktsii zhelatelnosti Kharringtona pri reshenii optimizatsionnykh zadach khimicheskoy tekhnologii: uchebno-metod. posobiye [Using the Harrington desirability function in solving optimization problems of chemical technology. Educational method. Allowance]. Moscow: RKhTU im. DI. Mendeleev. 2003. 76 p.
4. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Integral assessment of the electrical contact properties of composite materials using the Harrington desirability function. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2021. No. 4 (12), pp. 14–22. (In Russian).
5. Korotkov V.M. Optimization of the composition of an electrically conductive lubricant composition for operational use in a collector-brush assembly of a traction electric motor. *Computational nanotechnology*. 2019. V. 6. No. 2, pp. 16–20. (In Russian).
6. Pal S., Gauri S.K. A desirability functions-based approach for simultaneous optimization of quantitative and ordinal response variables in industrial processes. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2018. V. 10. No. 1, pp. 76–87.
7. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Integral assessment of landscape pollution using the Harrington desirability function. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2014. No. 4, pp. 101–113. (In Russian).
8. Lyubushin N.P., Brikach G.E. The use of the generalized Harrington desirability function in multiparameter economic problems. *Ekonomicheskiiy analiz: teoriya i praktika*. 2014. No. 18 (370), pp. 2–10. (In Russian).
9. Kharitonov E.A., Mikhailov O.V. Desirability function and the possibility of its application for assessing scientific activity in national research universities. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. V. 19. No. 14, pp. 142–145. (In Russian).
10. Koroleva S.V. Practical aspects of using the desirability function in a biomedical experiment. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2011. No. 6. P. 71.
11. Gusev A.F., Izmailov V.V., Novoselova M.V. Experimental setup for studying brush-collector sliding contact at high temperatures. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2022. No. 1 (13), pp. 14–21. (In Russian).
12. Electrical Contacts: Principles and Applications. Ed. by P.G. Slade. CRC Press. 2014. 1210 p.

Поступила в редакцию/received: 16.12.2021; после рецензирования/revised: 14.01.2022;
принята/accepted: 24.01.2022