

7 Принципы создания смазочных материалов с нанокластерными добавками для тяжело-нагруженных трибосопряжений / В.И. Колесников, Ф. Даниэль, Н.А. Мясникова, М.А. Савенкова // Вестник РГУПС. – 2009. – № 1 (33). – С. 12–15.

Bibliography

1 Study of friction characteristics of plastics lubricants for rail with inorganic polymers as additives / V.I. Kolesnikov, M.A. Savenkova, S.B. Bulgarevich, A.V. Chelohyan, E.A. Bulavina, M.V. Boyko // Treniye i iznos. – 2008. – Vol. 29. – № 3. – P. 261–267.

2 Adsorption of heteropolyphosphates of alkali metals on the surface of iron / V.I. Kolesnikov, Yu.F. Migal, M.A. Savenkova, S.N. Mizhiritskaya // Treniye i iznos. – 2009. – Vol. 30. – № 6. – P. 556–563.

3 Chemical encyclopaedia. – Moscow : Scientific Publishing House in the «Big Russian Encyclopaedia». – 1995. – Vol. 1. – P. 256.

4 **Mirkin, L.I.** Reference Book on X-ray Structural Analysis of Polycrystals / L.I. Mirkin. – Moscow : Fizmatgiz, 1971. – 437 p.

5 **Melnikov, P.P.** Physical-chemical research of phosphates : textbook / P.P. Melnikov, L.N. Komissarova. – Minsk : Nauka, 1981. – 101 p.

6 **Appen, A.A.** Chemistry of glass / A.A. Appen. – Leningrad : Chemistry, 1984. – 348 p.

7 Principles of Development of lubricants with nanoclusters additions for loaded triboconjugations / V.I. Kolesnikov, F. Daniel, N.A. Myasnikova, M.A. Savenkova // Vestnik RGUPS. – 2009. – № 1 (33). – P. 12–15.

УДК 629.42 : 621.313 + 06

В.М. Коротков

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩАЯ СМАЗОЧНАЯ КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

В настоящее время изучено большое количество методов повышения работоспособности коллекторно-щеточных узлов (КЩУ), общей чертой которых является создание на поверхности контакта материалов тонких переходных слоев, не влияющих на токопрохождение в контакте и снижающих интенсивность механического изнашивания [1–3]. Наибольшее распространение в практике применения твердых смазочных композиций получили графит и дисульфид молибдена (MoS_2) в различных соединениях (графит, циатим и др.). Правда, пленка, образованная MoS_2 , является электрически не проводящей, что ухудшает процесс токопрохождения в КЩУ и вызывает тем самым снижение качества коммутации всей электрической машины. Поэтому область применения известных смазочных композиций с MoS_2 в КЩУ весьма ограничена и эффект от их использования заметен в низкоскоростных металлических контактных парах при низких плоскостях тока.

Наряду с положительными свойствами смазочных композиций, обеспечивающими снижение механических потерь, налицо проявление и негативных – ухудшение электрических свойств контакта, приводящих к искрению и электрической эрозии. Наличие многофакторного воздействия, которое существует при работе КЩУ, вызывает необходимость в оптимальном сочетании свойств граничных слоев, обеспечивающих одновременное удовлетворение антагонистических требований к фрикционным и электрическим характеристикам контакта.

Нами была предпринята попытка применить электропроводящую смазочную композицию в КЩУ электрической машины большой мощности (ЭМБМ). Анализ данных, полученных в ходе работы, показал, что смазочная композиция способствует снижению коэффициента трения на 2,5–3 %, увеличению износостойкости щеточного материала (щетке ЭГ-61) до 20–25 % и улучшению условий коммутации всей ТЭМ. Приведенные результаты подтверждают наше мнение о реальной возможности применения электропроводящей смазочной композиции как элемента, способствующего повышению работоспособности такого сопряжения, каковым является КЩУ ЭМБМ [3, 4].

Представляет интерес оценка влияния вводимых включений на электромеханические и триботехнические свойства смазочных композиций. Правильно подобранный количественный и качественный состав композиций может одновременно удовлетворить электрическим и механическим ограничениям, накладываемым на КЩУ, как самой конструкцией, так и чрезвычайно жесткими условиями эксплуатации, что в конечном итоге приведет к повышению надежности в работе всей тяговой электрической машины.

Для повышения износостойкости КЩУ и обеспечения непрерывного прохождения электрического тока через зону контакта могут служить мелкодисперсные проводящие частицы, входящие в состав смазки. В этом случае перспективны для использования в качестве дисперсных электропроводных наполнителей мягкие металлы с высокой электропроводностью (медь).

Но, учитывая ее довольно высокую окислительную активность, а также развитую поверхностную активность в дисперсном состоянии, использование меди вызывает необходимость во введении в состав смазочной композиции антиоксидантов, в нашем случае назовем их антиокислительным наполнителем (АН) [5].

Одним из основных в проблеме обеспечения эффективной работы КЩУ является вопрос о механизме прохождения электрического тока в контакте. От механизма токопрохождения в КЩУ зависят не только его электрические характеристики, но и триботехнические. На механизм токопрохождения существенное влияние оказывает слой, формирующийся на металлической поверхности, в нашем случае медный коллектор, композиционным материалом – электрической щеткой. В значительной мере фазовый состав переходного слоя зависит от условий эксплуатации КЩУ и от состава конкретных элементов, входящих в сопряжение. Неоднородность переходного слоя на коллекторе связана с рядом электрических и триботехнических условий работы электрической машины. К сожалению, в настоящее время на практике внешний вид коллекторной пленки служит критерием, по которому определяется качество работы как узла токосъема, так и всей электрической машины. Хотя обнаружено отсутствие закономерностей между составом переходного слоя и электрическими характеристиками контакта.

В настоящее время большое количество исследований посвящено изучению электропроводящих и триботехнических свойств переходных слоев и их влияния на характер токопрохождения. Особенно актуальна эта проблема при формировании на поверхности коллектора переходных слоев и их влияния на характер прохождения, одновременно удовлетворяющих антагонизму между электрическими и триботехническими характеристиками контакта, в нашем случае при применении электропроводящей смазочной композиции.

Хольм и его последователи [2, 3] создали модель переходного слоя, в которой перенесенный материал (ПМ) щетки располагается в микровпадинах поверхности коллектора, оставляя свободными вершины микровыступов (рис. 1, а). Они считают, что на условия токопрохождения в контакте определяющую роль оказывает слой закиси меди Cu_2O , образующийся на вершинах микровыступов. ПМ, расположенный в микровпадинах поверхности коллектора, играет лишь второстепенную роль.

Авторы работ [1–6] создали свою модель переходного слоя, в которой толщина ПМ сравнима с высотой микровыступов поверхности коллектора. Слой ПМ неоднороден, он прерывается только на вершинах наиболее высоких микронеровностей (рис. 1, б). Контакт электрощетки с металлом коллектора происходит через слой закиси меди. Контакт через сплошной слой перенесенного материала маловероятен.

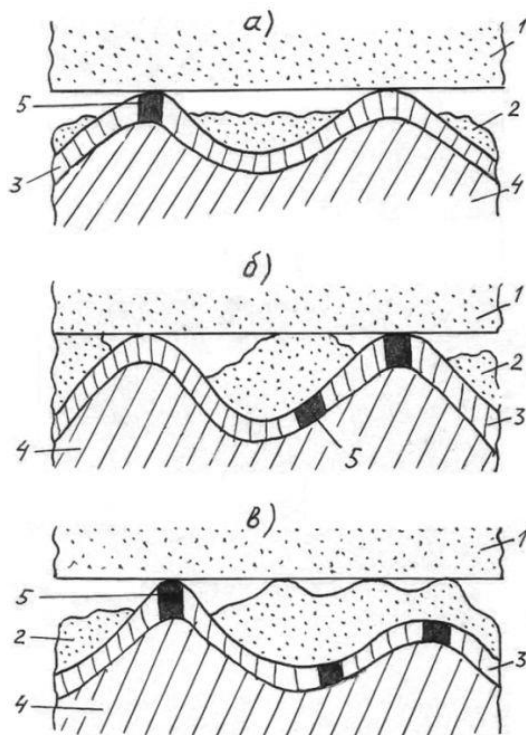


Рис. 1. Модели переходного слоя на поверхности меди коллектора при работе в паре с самосмазывающимися контактными материалами:

1 – самосмазывающийся контактный материал; 2 – перенесенный материал;
3 – окисная пленка; 4 – металл коллектора;
5 – участки с туннельнопроводящей или разрушенной окисной пленкой

Для выявления механизма токопрохождения в контакте нами были предложены три состава электропроводящих смазочных композиций (см. таблицу).

Наименование	Основа, пластичная смазка, об. %	Мелкодисперсный порошок меди, об. %	Антиокислительный наполнитель, об. %
Смазка – 1	80	10	10
Смазка – 2	70	15	15
Смазка – 3	60	20	20

Особо остро эта проблема возникает при исследовании переходных слоев, образованных смазочными композициями, содержащими электропроводные наполнители. В связи с этим, нами для дальнейших исследований было применено устройство, разработанное в Институте механики металлополимерных систем.

Данное устройство ЭП-1 создано на базе профилометра модели «201» (рис. 2), где образец и игла являются элементами электрической цепи регулируемого источника постоянного или переменного напряжения. Падение напряжения в контакте иглы с образцом, ток в цепи и профиль поверхности одновременно регистрируются с помощью быстродействующего прибора Н-338-4П. Вместо алмазной иглы в устройстве используется электропроводящая игла из нержавеющей стали с радиусом закругления $r_0 = 30\text{--}50$ мкм. Коромысло с иглой электрически изолировано от якоря и ножевой опоры. Нажатие иглы на испытуемую поверхность путем компенсации неуравновешенности плеч установлено не более 2×10^{-4} Н. Варьирование электрических схем испытаний, микроскопическое наблюдение через микроскоп МБС-2 дало возможность определять контактное сопротивление, вольтамперные характеристики, напряжение фриттинга в любой заданной точке исследуемой поверхности трения. Описанное устройство использовалось для изучения электрических свойств и структуры переходных слоев, формируемых на поверхности медного коллектора электрическими графитными щетками без и с применением предложенных электропроводящих смазочных композиций при работе в нормальных условиях.

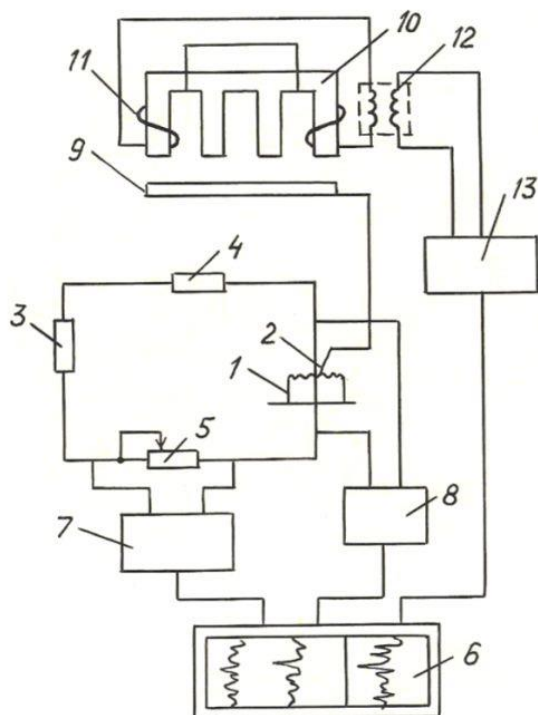


Рис. 2. Схема установки ЭП-1:

- 1 – образец; 2 – игла; 3 – источник напряжения;
- 4 – дополнительное сопротивление для обеспечения постоянного тока в цепи;
- 5 – калибровочное сопротивление для измерения силы тока;
- 6 – многоканальный самописец;
- 7, 8, 13 – усилители; 9 – якорь;
- 10 – Ш-образный сердечник; 11 – катушки;
- 12 – дифференциальный трансформатор

Исследования показали, что на большинстве участков пленки с явно выраженными слоями фрикционного переноса, образуемыми электрощетками без применения смазки при ЭДС источника тока $E' = 1$ В, что превышает электрическую прочность слоя смазки меди, имеет место фриттинг. Он проявляется на потенциограммах в виде отдельных участков высокой проводимости (рис. 3, а).

Для участков пленок с несильно выраженными слоями фрикционного переноса характерны резкие колебания U_k при $E' = 1$ В. Это показывает, что на поверхности трения меди отсутствует электропроводная пленка, которая может соединить образованный токопроводящий участок с соседним исследуемым. Из этого следует, что структура переходного слоя в данном случае описывается моделью, представленной на рис. 1, а.

Однако результаты исследований пленок, образованных щетками с применением электропроводящей смазочной композиции, показали иную картину токопрохождения, зависящую от состава смазочной композиции. Так, с применением в КЩУ «Смазки-1» на поверхности меди образовалась пленка с относительно высокой проводимостью в небольших областях размером от 5 до 25 мкм (рис. 3, б), что может соответствовать прохождению щупа по некоторым изолированным друг от друга впадинам, заполненным электропроводным материалом. Это можно объяснить тем, что структура пленки соответствует модели, показанной на рис. 1, б.

Результаты исследований слоев, образованных на контртеле «Смазкой-2» и «Смазкой-3», оказалось невозможным объяснить с помощью моделей переходных слоев, представленных на (рис. 1, а, б). Так, при движении щупа по поверхности коллектора практически на всех точках, даже на участках с четко выраженными слоями фрикционного переноса «Смазка-3»), независимо от ЭДС источника наблюдается высокая проводимость и лишь на отдельных участках наблюдается повышенное электросопротивление («Смазка-2»).

Полученные результаты свидетельствует об отсутствии сплошного изолирующего слоя окиси меди на поверхности трения коллектора. Перенесенный электропроводный материал имеет непосредственный электрический контакт с матричным металлом коллектора. В нашем случае этот переходный слой можно представить моделью, разработанной Н.К. Мышкиным [5] (рис. 1, в). Согласно представлениям, щеточный материал с электропроводящими металлическими добавками переносится как на участки меди коллектора, покрытые пленкой окиси, так и на участки, полностью обнаженные. Благодаря своей коррозионной стойкости этот материал предохраняет участки контактирования от дальнейшего окисления. Это позволяет длительное время сохранять стабильный электрический контакт между этим слоем и матричной медью.

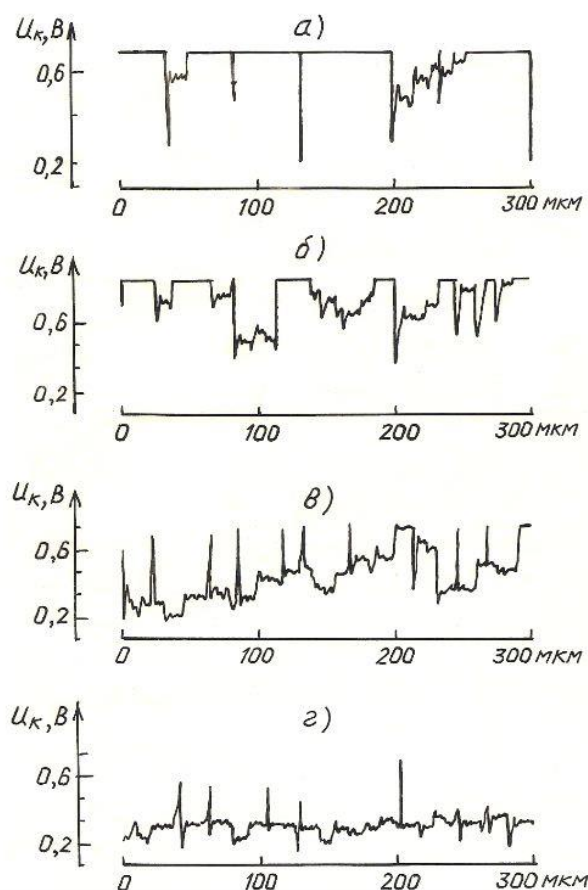


Рис. 3. Потенциограммы при скольжении стального щупа по поверхности медного коллектора, работавшего в паре с щетками ЭГ-74:
 а – ЭГ-74 без смазки; б – ЭГ-74+ «Смазка-1»;
 в – ЭГ-74+ «Смазка-2»; г – ЭГ-74+ «Смазка-3»

В этом случае при любых величинах тока основная его доля передается через слой ПМ.

Итак, нами рассмотрены три модели переходного слоя, образованные на поверхности коллектора при работе в паре без электропроводящей смазочной композиции и с ней. Из полученных результатов видно, что применение в КЩУ «Смазки-3» позволяет добиться почти полной электропроводности в контакте, тогда как при работе с электрографитными щетками имеет место фриттинг

наработанной пленки с частичным отсутствием проводимости. Значит, «Смазка-3» наиболее полно удовлетворяет электрическим требованиям, предъявляемым к работе КЩУ. В связи с этим возникает вопрос о механизме токопрохождения в контакте, т.к. структура переходного слоя на поверхности коллектора определяет механизм передачи электрического тока и поведение электрических характеристик КЩУ.

Коротко остановимся на механизме токопрохождения в КЩУ с переходными слоями, образованными электрощетками без применения смазочной композиции и со «Смазкой-3». Выбор этих двух моделей не случаен. Он обусловлен тем, что вторая модель (рис. 1, б) занимает как бы промежуточное положение между ними, в то время как переходные слои, представленные моделями (рис. 1, а, в), предопределяют различные механизмы токопрохождения в контакте.

Согласно теории Хольма [3], разработавшего структуру переходного слоя на коллекторе (рис. 1, а), основная часть тока передается через слой закиси меди на вершинах микровыступов коллектора, а ПМ, расположенный в микровпадинах, играет второстепенную роль. При этом возникают контактные пятна следующих типов:

α -пятна, представляющие собой физический контакт поверхности щетки с расплавленной медью;

d -пятна, возникающие при контактировании щетки с твердой медью;

b -пятна в виде физического контакта щетки с закисью меди.

По Хольму, электрический ток большей своей частью передается через α и b , образующиеся в результате фриттинга оксидной пленки Cu_2O . В этом случае α -пятно образуется при плавлении меди на участке контактирования, а при температуре недостаточной для плавления меди имеет место контакт в виде d -пятна. Металлические пятна, обладая высокой химической активностью (окисление происходит в доли секунд), интенсивно окисляются. Это вызывает нарастание толщины слоя Cu_2O на пятнах контакта, которые подвергаются фриттингу. Таким образом, устанавливается динамическое равновесие между процессами фриттинга и окисления на контактных пятнах. Выходит, что доминирующим фактором, влияющим на величину контактного сопротивления, является толщина слоя закиси меди, образовавшаяся на вершинах микронеровностей поверхности коллектора.

Анализ экспериментальных данных, полученных в работах [6–8], дает возможность объяснить наблюдавшуюся нелинейность вольт-амперных характеристик (ВАХ) при формировании переходных слоев, образованных электрощетками без применения электропроводящей смазочной композиции, на поверхности коллектора (рис. 3, а). Действительно, вначале образуется пленка со сплошным слоем закиси меди и очень слабо выраженным слоем ПМ. Это характерно при твердых щетках электрографитного класса, применяющихся в КЩУ (ЭГ-2АФ, ЭГ-61А, ЭГ-63, ЭГ-75). Основная доля тока передается через контактные площадки на вершинах микровыступов поверхности коллектора, имеющих непосредственный контакт с щеткой, т.е. через b -пятна.

При средней толщине слоя Cu_2O на контактных площадках $h \sim 10^{-8}$ м, удельном сопротивлении закиси меди $\rho \sim 200$ Ом·м, радиусе площадок контакта $d \sim 10^{-6}$ м и их количестве $n \sim 10^2$ сопротивление единичного b -пятна $R_x \cdot 10^6 \dots 10^7$ Ом, а сопротивление n параллельно включенных b -пятен $10^4 \dots 10^5$ Ом. Если в КЩУ ток передается посредством b -пятен, то уже при плотностях токовых нагрузок более 0,1 мА/см² на контактных пятнах возникает перенапряжение, достигающее значений электрической прочности закисной пленки $\sim 10^8$ В/м, и происходит фриттинг с образованием α или a -пятен, сопровождающийся высокими локальными температурами, которые по мере наработки ПМ на поверхность коллектора, сравнимой с высотой его микровыступов, большие участки поверхности имеют электрический контакт с щеткой посредством перенесенного материала. В этом случае суммарное сопротивление прохождения электрического тока через слой ПМ на 3...4 порядка ниже, чем сопротивление b -пятна [5].

Таким образом, при малых плотностях тока в контакте электрический ток передается без фриттинга через слой перенесенного материала щетки, что объясняет значительную величину контактного сопротивления. Резкий изгиб ВАХ связан с фриттинг слоя ПМ и образованием токопроводящих мостиков под ним и в b -пятнах, это и приводит резкому снижению величины R_x (рис. 4, а).

В случае переходных слоев со стабильными электрическим контактом, образованным электрощетками с применением электропроводящей смазочной композиции, основная доля электрического тока при любых его величинах передается через слой ПМ. При снятии ВАХ на участках таких пленок большого первоначального сопротивления не наблюдалось. Это дает возможность сделать вывод о том, что вид ВАХ определяется не окисной составляющей коллекторной пленки, а свойствами пленки фрикционного переноса. Это положение можно проиллюстрировать на примере изучения электропроводящих свойств коллекторной пленки, образованной электрощетками со «Смазкой-3», на поверхности медного коллектора. Отсутствие сплошного изоляционного слоя закиси меди в коллекторной пленке (рис. 3, з) и низкое сопротивление стягивания на участках контактирования щетки со «Смазкой-3» и коллекторной пленки обеспечивают низкое значение ΔU и линейность ВАХ

(рис. 4, з). При отсутствии или уменьшенном содержании в электропроводящей смазочной композиции электропроводящего наполнителя определяющее влияние на свойства коллекторной пленки оказывает адгезия щеток.

Таким образом, структура переходного слоя на поверхности металла коллектора определяет механизм передачи тока и поведение электрических характеристик КЩУ металл коллектора – электрическая щетка. Тогда при формировании переходного слоя, образованного электропроводящей смазочной композицией, основная доля электрического тока будет передаваться через ПМ, причем, электропроводность которого определяет электрические характеристики КЩУ.

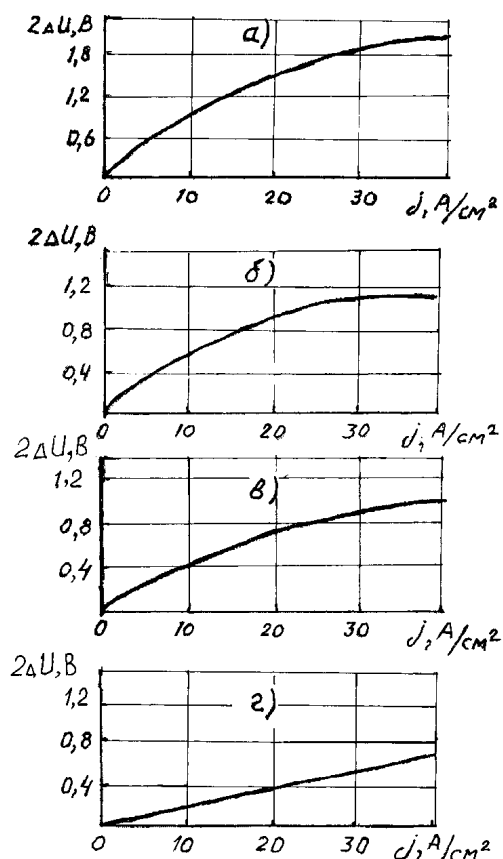


Рис. 4. ВАХ в точках контактирования щупа с пленкой, образованной на медном коллекторе электрощётками ЭГ-74:

a – без смазки; *б* – ЭГ-74+ «Смазка-1»;
в – ЭГ-74+ «Смазки-2»; *з* – ЭГ-74+ «Смазка-3»

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующий вывод: мы выяснили, что, применяя тот или иной состав смазочной композиции, можно управлять процессом прохождения электрическим током в контакте. В свою очередь, состав смазочной композиции должен удовлетворять механическим и электрическим характеристикам контакта, что требует его дальнейшей оптимизации.

Библиографический список

- 1 **Коротков, В.М.** Математическая модель и оптимизация процесса изнашивания материалов электрического скользящего контакта коллекторно-щеточного узла тяговой электрической машины / В.М. Коротков // Деп. в ЦНИИТЭТИ МПС. 17.10.1988. № 4675. Д88.
- 2 **Лившиц, П.С.** Щетки для электрических машин / П.С. Лившиц. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 270 с.
- 3 **Хольм, Р.** Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 464 с.
- 4 **Коротков, В.М.** Исследование трения, изнашивания и электропроводимости в электрическом скользящем контакте коллекторно-щеточного узла / В.М. Коротков // Трение и смазка машин и механизмов. – 2008. – № 11. – С. 33–35.
- 5 **Мышкин, Н.К.** Трибологические аспекты применения электрических контактов / Н.К. Мышкин // Трение и износ. – 1984. – Т. 5 (31). – С. 34–42.

6 **Коротков, В.М.** Влияние коллекторной пленки на процессы токопрохождения в электрическом скользящем контакте // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2011». – Ч. 2. – Ростов н/Д : РГУПС, 2011. – 450 с

7 **Коротков, В.М.** Влияние коллекторной пленки на процессы трения и изнашивания в электрическом скользящем контакте / В.М. Коротков // Труды Междунар. науч. конф. «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2011). – Ростов н/Д : РГУПС, 2011. – 410 с.

8 **Коротков, В.М.** Исследование возможности применения смазочных композиций в электрическом скользящем контакте / В.М. Коротков // Труды РГУПС. – 2010. – № 2 (13). – С. 38–43.

Bibliography

1 **Korotkov, V.M.** Mathematical model and optimization of the process of wear of materials electrical sliding contact of collector and brush knot of traction electric machines / V.M. Korotkov // Deposited in the Central Research Institute of Information and Feasibility Studies Russian Ministry of Railway Transport. 17.10.1988. № 4675. Д-88.

2 **Livshits, P.S.** Brushes for electrical machines / P.S. Livshits. – Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1961. – 270 p.

3 **Holm, R.** Electric contacts / R. Holm. – Moscow : Publishing House of Foreign Literature, 1961. – 464 p.

4 **Korotkov, V.M.** The Study of friction, wear and conductivity in electric-ish sliding contact commutator-brush Assembly / V.M. Korotkov // Treniye i smazka mashin i mekhanizmov. – 2008. – № 11. – P. 33–35.

5 **Myshkin, N.K.** Tribological aspects of application of electrical contacts / N.K. Myshkin // Treniye i iznos. – 1984. – Vol. 5 (31). – P. 34–42.

6 **Korotkov, V.M.** Influence of the collector film don the processes of ekopokolenie into the electricalish sliding contact / V.M. Korotkov // Proceedings of all-Russian scientific practical conference «Transport-2011». – Part 2. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2011. – 450 p.

7 **Korotkov, V.M.** Influence of the collector film on the friction and wear in electrical sliding contact / V.M. Korotkov // Proceedings of the International scientific conference «Mechanics and threebology of transport systems» (Metribuzin-2011). – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2011. – 410 p.

8 **Korotkov, V.M.** Research of possibility of application of lubricant compositions in the electrically-ish sliding contact / V.M. Korotkov // Trudy RGUPS. – 2010. – № 2 (13). – P. 38–43.