

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

Тимошенко Вячеслав Николаевич

**СНИЖЕНИЕ ИЗНОСА ЩЁТОК В КОЛЛЕКТОРНЫХ  
МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические  
аппараты

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
профессор кафедры «Электрические  
машины и аппараты» ВятГУ,  
заслуженный работник высшей  
школы, кандидат технических наук,  
Изотов А.И.

Киров 2018

*Выражаю глубокую благодарность научному консультанту Виктору Яковлевичу Беспалову за полезные рекомендации и поддержку при выполнении диссертационной работы.*

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Проблема износа токоведущих щёток в электрических машинах .....	12
1.1 Проблема износа токоведущих щёток в электрических машинах, работающих в нормальных климатических условиях .....	12
1.2 Способы снижения износа токоведущих щёток в электрических машинах общепромышленного применения .....	17
1.3 Проблема износа токоведущих щёток в электрических машинах, работающих в высотных условиях.....	22
1.4 Способы снижения износа токоведущих щёток в электрических машинах, работающих в условиях вакуума .....	26
Выводы по главе 1 .....	33
Глава 2. Снижение износа токоведущих щёток в коллекторных электродвигателях постоянного тока, предназначенных для работы в высотных условиях .....	34
2.1 Влияние политурной плёнки на износ токоведущих щёток в электрических машинах постоянного тока, работающих в высотных условиях .....	34
2.2 Влияние материала коллектора на износ токоведущих щёток .....	39
2.3 Влияние установки смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена, на износ токоведущих щёток .....	40
2.4 Результаты промышленных испытаний в высотных условиях двигателей постоянного тока герметизированного исполнения в случае применения щёточно-коллекторного узла, оборудованного смазывающей щёткой .....	44
2.5 Влияние хранения электрических машин на эффективность смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена.....	45
Выводы по главе 2 .....	47
Глава 3. Методика ускорения образования политурной плёнки на коллекторах электрических машин постоянного тока .....	49
3.1 Особенности работы стартёр-генератора ГС-12ТОК.....	49
3.2 Применение политуруобразующих щёток для снижения износа токоведущих щёток стартёр-генератора ГС-12ТОК .....	52
Выводы по главе 3 .....	67

Глава 4. Снижение износа токоведущих щёток в коллекторных электрических машинах переменного тока.....	70
4.1 Методика определения оптимального положения токоведущих щёток по уровню искрения в коллекторных электрических машинах переменного тока .....	70
4.2 Причины снижения искрения токоведущих щёток при не традиционном смещении их по направлению вращения якоря .....	77
4.3 Влияние применения реактивного щёткодержателя на снижение износа токоведущих щёток и уровень радиопомех .....	85
Выводы по главе 4 .....	91
Глава 5. Эффективность применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена в коллекторных электрических машинах переменного тока.....	92
5.1 Влияние материала коллектора на его температуру и эффективность применения смазывающих щёток .....	92
5.2 Расчёт влияния отклонений параметров щёточно-коллекторного узла на температуру в зоне контакта щётка-коллектор .....	99
5.3 Модели износа коллектора и токоведущих щёток при установке смазывающих щёток .....	104
Выводы по главе 5 .....	115
Заключение .....	117
Список литературы .....	122
Приложение I.....	137
Приложение II .....	138
Приложение III .....	141
Приложение IV .....	143
Приложение V .....	145
Приложение VI.....	146
Приложение VII.....	147
Приложение VIII .....	149
Приложение IX.....	150
Приложение X .....	152

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В настоящее время среди распространённых электромеханических преобразователей энергии имеются электрические машины, оснащённые системами скользящего токосъёма (коллекторные электрические машины постоянного тока, коллекторные электрические машины переменного тока, синхронные с обмоткой возбуждения и асинхронные электрические машины с фазным ротором). Коллекторные электрические машины активно используются для работы в высотных условиях. Связано это с имеющимися у них общепринятыми преимуществами перед бесконтактными машинами, такими как дешевизна и простота конструкции, наличие глубокого теоретического и практического базиса по конструированию и эксплуатации, как самих машин, так и щеточно-контактных узлов.

Одним из основных недостатков электрических машин, оснащённых щеточно-коллекторным узлом, является износ токоведущих щёток, который определяет ресурс работы электрической машины. Диссертация посвящена исследованию снижения износа щёток в коллекторных машинах постоянного и переменного тока в случае применения разных марок щёток и материала коллектора; применения смазывающих щёток, изготовленных на основе дисульфида молибдена и оценке влияния длительного хранения на эффективность применения смазывающих щёток; вопросам ускоренного образования политурной плёнки на коллекторе; уменьшению износа щёток в машинах постоянного тока, работающих в пусковых режимах; уменьшению износа щёток в коллекторных машинах переменного тока; созданию физических моделей износа щёток и коллектора в коллекторных машинах переменного тока без смазывающих щёток, а также в случае применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена и является актуальной.

**Цель диссертационной работы:** проведение экспериментальных и теоретических исследований по оценке возможности снижения износа токоведущих щёток в коллекторных электрических машинах постоянного и переменного тока, предназначенных для работы в нормальных и высотных условиях; снижение износа коллекторов; оценка эффективности применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена в сочетании с разными материалами коллекторов; создание методики по ускоренному образованию политурной плёнки на коллекторе в многощёточных системах; снижение износов щёток путём их смещения относительно геометрической нейтральной, а также уменьшение уровня радиопомех по мощности и напряжению в коллекторных машинах переменного тока.

**Предмет исследования:** процессы, происходящие в зоне контакта щётка-коллектор при образовании в ней политурной плёнки, параметры контакта, влияющие на износ токоведущих щёток и коллектора.

**Объект исследования:** коллекторные электрические машины постоянного тока, предназначенные для работы в нормальных и высотных условиях; коллекторные электрические машины переменного тока.

**Задачи исследования:**

Исследование причин повышенного износа токоведущих щёток при работе в высотных условиях при разной степени герметизации двигателей и способы его снижения за счёт выбора материала коллектора и применения смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена марки ДМС-140.

2. Разработка методики снижения износа токоведущих щёток за счёт установки в систему токопередачи наряду со штатными щётками токоведущих щёток, обладающих повышенной скоростью образования политурной плёнки с

оценкой их эффективности по результатам заводских и лётных испытаний. Выработка рекомендаций по их внедрению в серийное производство.

3. Разработка методики определения оптимального положения токоведущих щёток (по уровню искрения) в коллекторных электрических машинах переменного тока при неподвижной траверсе с внедрением результатов в серийное производство.

4. Разработка методики снижения износа щёток и радиопомех по мощности и напряжению в коллекторных машинах переменного тока за счёт смещения щёток по направлению вращения на половину тангенциального размера щётки параллельно её штатному положению.

5. Исследование влияния материала коллектора на эффективность применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена марки ДМИ-7 в коллекторных машинах переменного тока.

6. Проведение расчётов по оценке эффективности влияния параметров (10 параметров) щёточно-коллекторного узла, выполненного из профиля марки ПКМ (профиль коллекторный медный) и ПКМС (профиль коллекторный медный, легированный серебром) на максимальную температуру в зоне контакта щётка – коллектор.

7. Создание физической модели износа токоведущих щёток Г-33И в коллекторном двигателе переменного тока (профиль коллектора марки ПКМС) в случае применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена при варьировании частотой вращения, удельным давлением на смазывающую и токоведущие щётки.

8. Создание физической модели износа коллектора при варьировании частотой вращения, шириной токоведущей щётки и удельного давления на токоведущие щётки.

9. Создание физической модели износа коллектора в случае применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена при варьировании частотой вращения, удельным давлением на смазывающую и токоведущие щётки.

**Методы исследования.** Задачи, поставленные в диссертационной работе, решались экспериментальными и математическими методами исследований с использованием теории электротехники, трибологии и электромеханики. Применялись информационные компьютерные технологии и программные пакеты. При решении вычислительных задач использовались пакеты программ MathCAD®, Microsoft Excel®, Contact [95]. Опытные исследования анализировались с помощью методов планирования эксперимента и по стандартным методикам.

### **Научная новизна:**

1. Выявлены причины повышенного износа токоведущих щёток у электрических двигателей постоянного тока с высокой степенью герметизации (при отсутствии дренажа), работающих в высотных условиях. Повышенные износы щёток связаны с уменьшением сопротивления политурной плёнки (уменьшением её толщины) из-за уменьшения содержания кислорода и влаги внутри двигателя при работе этих двигателей при наличии дренажа. Разработан способ снижения износа токоведущих щёток при работе в нормальных и высотных условиях за счёт установки на коллектор нетокопроводящей смазывающей щётки, выполненной из дисульфида молибдена марки ДМС-140. За счёт применения смазывающей щётки износ токоведущих щёток уменьшается при работе на плюсовых и минусовых температурах в 5 и 7 раз соответственно. Характеристики двигателей соответствуют техническим условиям на их поставку. Из трёх материалов коллектора (медь, кадмиевая бронза, хромовая бронза) наименьший износ щёток обеспечивает хромовая бронза. Эффективность смазывающих щёток также зависит от материала коллектора. Наибольшая эффективность наблюдалась в случае применения коллекторов, выполненных из хромовой бронзы.

2. Разработана методика ускоренного образования политурной плёнки на коллекторе за счёт включения в систему токопередачи наряду со штатными щётками щёток, обладающих повышенной скоростью образования политурной



плёнки. Проведена оценка политуруобразующих свойств отечественных марок щёток ЭГ-74, ЭГ-54П, ЭГ 75, ЭГ-4, ЭГ-61А и ЭГ-61 при работе на холостом ходе и под нагрузкой. Наилучший результат показали щётки ЭГ-61А и ЭГ-74. Проведена оценка их эффективности по ускорению образования политурной плёнки в сочетании со штатными щётками МГС-7. Применение политуруобразующих щёток ЭГ-61А позволило увеличить ресурс щёток генератора ГС-12ТОК по результатам лётных испытаний более чем в два раза. По допустимой критической высоте щёток ожидаемое увеличение ресурса более пяти раз.

3. Разработана методика определения оптимального положения токоведущих щёток на коллекторе (по минимальной величине искрения) в коллекторных машинах переменного тока с установкой щёток в корпусе двигателя (без возможности их смещения). Применение методики в коллекторных машинах переменного тока мощностью 1,8; 2; 2,2 кВт позволило сделать заключение о возможности снижения искрения не только в случае традиционного смещения щёток против направления вращения, но и при смещении по направлению вращения.

4. Разработана конструкция щёточно-коллекторного узла коллекторного двигателя переменного тока, в котором радиальная щётка смещается по направлению вращения коллектора параллельно своему положению на половину тангенциального размера щётки, что приводит к снижению износа щёток и уровня радиопомех по мощности и напряжению.

5. Исследовано влияние материала профиля коллектора (ПКМ и ПКМС) двигателя привода машины шлифовальной угловой МШУ-2,4-230М на эффективность применения смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена с расчётом микротемператур в зоне контакта щётка – коллектор. Применение смазывающей щётки в случае коллектора, выполненного из профиля марки ПКМ, привело к увеличению износа токоведущих щёток. В случае профиля ПКМС износ был снижен в несколько раз в режиме номинальной нагрузки. Проведённые расчёты по программе

Contact [95] показали, что причина неэффективности смазывающей щётки в случае материала ПКМ обусловлена высокой температурой в зоне контакта, которая превышает 400°C. При профиле марки ПКМС температура в зоне контакта соответствовала 237°C.

6. Исследовано влияние отклонений параметров контакта токоведущая щётка – коллектор на максимальную температуру в зоне контакта щётка – коллектор. Наиболее эффективно на максимальную температуру влияют при профиле марки ПКМ в номинальном режиме: жесткость токоведущей щетки, жесткость материала коллектора и температура рекристаллизации; при коллекторе из профиля марки ПКМС - высота и плотность материала коллектора .

7) Составлены физические модели износа щёток и коллектора при установке смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена марки ДМИ-7, которые были использованы при проектировании коллекторного электродвигателя переменного тока мощностью 2,4 кВт. Результаты подтверждены актом промышленных испытаний. Износ коллектора при оптимальном давлении на смазывающую щётку был уменьшен в два раза, износ щёток Г-33И был уменьшен в 2,2 раза, щёток Г-33МИ – в 1,7 раза. Составлена физическая модель износа коллектора при работе без смазывающей щётки.

### **Практическая значимость работы:**

1. Даны рекомендации по выбору материала профиля коллекторов электрических машин, обеспечивающих минимальный износ токоведущих щёток, работающих в нормальных и высотных условиях.

2. Доказана высокая эффективность по снижению износа токоведущих щёток (до 7 раз) при работе в высотных условиях в герметизированных двигателях, предназначенных для работы в высотных условиях, за счёт применения смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена.

3. Представлены результаты исследований по эффективности применения смазывающей щётки в герметизированных двигателях, предназначенных для работы в высотных условиях, с разными материалами коллектора (медь, кадмиевая бронза, хромовая бронза). Наибольшую эффективность имеет место в случае применения хромовой бронзы. Снижение износа относительно коллектора из медного профиля достигает 5,7 раза.

4. Приведены результаты влияния сроков хранения электродвигателей (один год и один год девять месяцев) на эффективность применения смазывающих щёток. Сроки хранения не оказывают влияния на эффективность смазывающих щёток.

5. Предложена методика ускорения образования политурной плёнки в многощёточных системах за счёт включения в систему токопередачи щёток, обладающих повышенной скоростью образования политурной плёнки; объективность методики подтверждена результатами лётных и заводских моторных испытаний. По результатам лётных испытаний применение политуруобразующих щёток ЭГ-61А позволяет увеличить ресурс щёток более чем в три раза. Ожидаемый эффект по снижению износа щёток (до критического значения) достигает пяти раз.

6. Экспериментально доказана возможность (в некоторых случаях) снижения степени искрения в коллекторных машинах переменного тока при постоянном тормозном моменте на валу за счёт смещения токоведущих щёток по направлению вращения якоря, обеспечивающая улучшение технико-экономических показателей двигателя.

7. По результатам исследований внедрены в серийное производство двигатели трёх типов различной мощности привода МШУ-1,8-230, МШУ-2-230, МШУ-2,2-230, имеющих не традиционное смещение щёток по направлению вращения на одно коллекторное деление с уменьшенным числом витков обмотки возбуждения с реальным годовым экономическим эффектом 2,7 млн. руб., а также двигатель МШУ-2-230П, имеющий смещение щёток против направления вращения.

8. Физические модели износа коллектора и щёток в случае применения смазывающей щётки в коллекторном двигателе переменного тока позволяют на стадии проектирования двигателя оценивать возможность применения смазывающих щёток.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. снижение износа токоведущих щёток в коллекторных машинах постоянного тока, предназначенных для работы в высотных условиях, за счёт установки смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена с оценкой влияния степени герметизации двигателя;

2. оценка материала коллектора, сроков хранения и условий эксплуатации на эффективность применения смазывающих щёток в электрических машинах, предназначенных для работы в высотных условиях;

3. методика ускоренного образования политурной плёнки в многощёточных системах токосъёма за счёт включения в систему токопередачи наряду со штатными щётками щёток, обладающих высокой скоростью образования политурной плёнки;

4. методика снижения степени искрения и уровня радиопомех (по мощности и напряжению) в коллекторных двигателях переменного тока с щёткодержателями жёстко установленными в корпусе за счёт смещения щёткодержателей по направлению якоря на половину тангенциального размера токоведущих щёток;

5. методика снижения износа коллектора в коллекторных машинах переменного тока за счёт установки смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена;

6. физические модели износа коллекторов, выполненных из профиля марки ПКМС (щётки Г-33И);

7. физические модели износа коллекторов изготовленных из профиля марки ПКМС и токоведущих щёток марки Г-33И, в случае использовании смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена.

**Реализация результатов работы.** Достоверность результатов проведённых исследований подтверждаются тремя актами лётных и моторных испытаний, одним актом промышленных испытаний. Результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: 7-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2008», г. Москва, 2008г.; XIII-я, XIV-я Международные конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», г. Алушта, 2010г., 2012г.; Международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии», г. Омск, 2013г., ежегодные научно-практические конференции ВятГУ «Наука – производство – технология – экология», г. Киров, 2003-2017 гг. В 2012 г. работа «Применение нанотехнологий для снижения износа щёток авиационного стартёр-генератора» получила Премию Кировской области в области науки и техники.

**Внедрение результатов работы.** По результатам проведённой работы на АО "Электромашиностроительный завод «ЛЕПСЕ» получено два акта внедрения двигателей привода машины шлифовальной угловой (МШУ) в серийное производство с годовым экономическим эффектом 2,6 млн. руб.

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 печатная работа (из них 9 рецензируемых научных изданиях их перечня ВАК РФ, 3 издания входят в базу данных Scopus), два патента: МПК H01R 39/44 №2309498, МПК H01R 39/04 №2291530, один патент на полезную модель МПК H01R 39/00 №91479.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения, списка литературы и 10 приложений, содержит 24 рисунка и 62 таблицы, список использованных литературных источников содержит 132 наименования. Полный объём диссертации составляет 152 страницы.

# ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ИЗНОСА ТОКОВЕДУЩИХ ЩЁТОК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

## 1.1 Проблема износа токоведущих щёток в электрических машинах, работающих в нормальных климатических условиях

Ресурс работы электрической машины с щёточно-коллекторным узлом определяется ресурсом систем скользящего электрического контакта. Существуют различные объяснения процессов, протекающих в зоне скользящего электрического контакта, основанные на экспериментах Е. Арнольда [4], Р.Мейера [90], Р. Хольма [119], И. Нейкирхена [92]. Это связано с тем, что процессы механического трения и износа представляют собой сложную совокупность явлений, в которых участвуют упругие и пластические деформации, силы межчастичного сцепления, возникающие на контактных участках сопряжённых поверхностей, структурные изменения, термоэлектрические и электрохимические процессы, различного рода процессы сорбции (поглощение вещества из газообразной или жидкой среды) и др. [76]. Кроме передачи рабочего тока вращающимся частям электрической машины, щётки должны работать с минимальным трением. В процессе механического трения под воздействием сил трения происходит взаимное изнашивание трущихся деталей, выделяется тепло, появляются вибрации, интенсивно происходят химические реакции.

Согласно Арнольду, плотность тока равномерна по всей контактирующей поверхности щётка-коллектор и удельное сопротивление щёточного контакта является постоянным. Гипотеза не объясняла зависимость переходного падения напряжения в щёточном контакте от плотности тока под щёткой, а повышенный износ щёток объяснялся плохой коммутацией. Однако Арнольд впервые указал на зависимость переходного падения напряжения в щёточном контакте от плотности тока и его направления, от химических свойств контактных поверхностей, от давления на щётку и скорости перемещения скользящих контактов.

И. Нейкирхен щёточный контакт разделил на три разные зоны, по которым передаётся энергия.

1. Непосредственный механический контакт. Механический контакт состоит из отдельных контактных точек. Площадь контактных точек составляет от  $1/200$  до  $1/10000$  кажущейся площади контактирования щетки. При работе машины происходит непрерывное смещение в различных направлениях контактных точек и как следствие происходит механическое истирание щеток. Плотности тока в этих точках значительно превышают плотности тока в теле самой щетки.

2. Пылевидные частицы материалов щетки, коллектора и колец. Между поверхностями щётки и коллектора находится клиновидное пространство, состоящее из частиц угольной и металлической пыли, образующее пылевидную зону. В случае контактов, в которые введены твердые смазывающие материалы, пылевую зону заполняют частицы смазывающих материалов.

3. Ионизированные воздушные щели. С пылевой зоной граничит зона пробоя. Пробой возможен из-за малого расстояния между поверхностями щетки и коллектора, где ток проводится путем ионной и электронной эмиссии. Эта проводимость преобладает при больших плотностях тока под щеткой, если контактные поверхности имеют высокую температуру.

М.Ф. Карасев [77] ввёл ещё один способ передачи энергии – через дуговые и искровые разряды. Во время разряда происходит перенос материала: в области дугового разряда материал переносится с катода на анод, в области искрового – с анода на катод. Из анода вырываются круглые зёрна, химически точно соответствующие материалу анода.

Р. Мейер [90] делит износ щёток на механический и электрический. Передача энергии идёт через частицы, выделяемые щётками в процессе их механического и электрического износа. При механическом износе за счёт механических факторов от щёток отделяются частицы, которые имеют неправильную форму и относительно большие размеры (порядка нескольких

десятков микрон). Их количество невелико и они остаются частично внедрёнными в тело щётки. При электрическом износе от щёток отделяются мелкие (до 1 мкм) сферические частицы, количество которых пропорционально плотности тока. Эти частицы создают переходный слой, играющий роль смазки. Теория объясняет падение удельного сопротивления скользящего контакта с ростом плотности тока увеличением количества выделяющихся сферических частиц, что также ведёт к изгибу вольтамперной характеристики скользящего контакта.

В воздухе при нормальных условиях есть водяные пары, различные окислы, которые под действием искрения приводят к электролизу. Под катодной щеткой происходит окисление металла, а под анодной - его восстановление, этим теория электролиза объясняет различия в свойствах скользящего разнополярного контакта [10].

Ван Брунт и Севидж [132] обнаружили, что в результате электролиза на коллекторе образуется пленка, называемая политурой, которая на медных коллекторах состоит из закиси меди  $\text{CuO}$  (65.8 %), углеродистого материала электрощеток  $\text{C}$  (22,1 %) и некоторого количества (12,7%) примесей  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO}$ . Примеси вносятся из материала электроугольных изделий и окружающей среды. Политурная пленка (ПП) имеет повышенную твердость и тепловую устойчивость. Толщина ПП равна 20-50<sup>0</sup>Å. Образование ПП – сложный динамический процесс, зависящий от многих переменных факторов, главные из которых: свойства материала щёток, температура, состав окружающей среды, величина удельной токовой нагрузки и условия коммутации.

Если в щёточный контакт ввести твердые смазывающие материалы, то на поверхности коллектора образуется пленка смазывающего материала, которую также принято называть политурной. Она имеет вид непрерывной оболочки, покрывающей всю контактную поверхность.

В зависимости от характера контакта трущихся поверхностей различаются следующие виды трения [128]:



1. Трение чистых поверхностей, или «чистое» трение, возникающее на поверхностях, свободных от граничных плёнок. «Чистое» трение может наблюдаться лишь в условиях высокого вакуума.

2. Трение сухих поверхностей или «сухое» трение, возникающее на поверхностях, свободных от нанесённого извне слоя смазочных веществ. При «сухом» трении предполагается отсутствие преднамеренной смазки трущихся поверхностей.

3. Граничное трение, имеющее место при нанесении на контакт полимолекулярного слоя смазки. Граничный слой смазки имеет особое строение. Сила граничного трения обусловлена поверхностными свойствами граничного слоя, который существенно зависит от природы и состояния трущихся поверхностей.

4. Жидкостное трение, при котором контактируемые поверхности разделены слоем вязкой жидкости. При жидкостном трении нагрузка между сопряжёнными деталями передаётся через слой смазки, грузоподъёмность которого обусловлена гидродинамическим эффектом. Условия работы скользящего электрического контакта в большинстве случаев затрудняют возможность создания чисто жидкостного трения.

Болмен и Спедборо [123, 131] указывают, что при трении графита происходит образование эластичных роликов и микровыступов графита на рабочей поверхности щёток, обуславливающих переход от трения скольжения к трению качения.

Р. Хольм [119] проводимость скользящих контактов объясняет возникновением и расширением проводящих дискретных  $\alpha$  - пятен. Сопротивление поверхностной плёнки окиси меди при отсутствии её механического повреждения велико. Токопередача идёт за счёт электрического пробоя плёнки окиси меди, который называется фриттингом, а также за счёт проводимости образовавшихся за счёт фриттинга  $\alpha$  - пятен. Напряжение пробоя зависит от толщины плёнки. Напряжение пробоя плёнки окиси толщиной 50 ангстрем составляет 0,5 В, а при толщине 400 ангстрем – 1,5 В.

Пробой плёнки приводит к образованию кратковременных токопроводящих пятен, которые за несколько оборотов коллектора полностью окисляются [118].

Другие исследования на медных и бронзовых кольцах [16] опровергли теорию Хольма, показав что при отсутствии на поверхностях посторонних плёнок от смазочных материалов проводимость за счёт фриттинга, если существует, то не является определяющей. Это связано с тем, что ПП имеет собственную проводимость, её разрушение может не происходить, а, следовательно,  $\alpha$  - пятна могут не возникнуть.

На собственную проводимость ПП указывает Ф. Шротер [129]. ПП является полупроводником с дырочной проводимостью, которая сильно зависит от температуры. В экспериментах при нагревании коллектора до 70 °С токопроводящие свойства плёнки резко увеличиваются, а сопротивление ПП стремится к нулю.

В обычных атмосферных условиях ведущий вид износа электрощёток определяется не процессами трения, а явлением, связанным с прохождением тока. Влияние электрических факторов на износостойкость особенно существенно для электромашин с затруднёнными условиями коммутации. Повышенное искрение является важным фактором увеличения износа щёток вследствие развития явления электрической эрозии.

Таким образом, для машин, работающих в нормальных климатических условиях, теория износа электрощёток не имеет единственного объяснения процессов, протекающих в зоне контакта щётка-коллектор. Изучение процесса трения усложняет наличие ПП, состав которой зависит от материалов пар трения и внешних факторов. Передача энергии может осуществляться посредством механического контакта, через частицы материала щётки, путём пробоя дуговым или искровым разрядом. Износ щётки можно разделить на механический и электрический. Преобладание того или иного вида износа зависит от условий работы машины.

## **1.2 Способы снижения износа токоведущих щёток в электрических машинах общепромышленного применения**

Основными параметрами скользящего контакта являются величина износа щёток и падение напряжения в щёточном контакте, которые определяются током щётки, усилием нажатия на щётку, линейной скоростью относительного перемещения щётки и искрением. Для снижения износов щёток возможны следующие направления: снижение коэффициента трения и повышение стабильности контактирования щётки с коллектором.

В [45] оценивается влияние щёточного перекрытия на износ щёток в коллекторной машине переменного тока. Щёточное перекрытие изменялось за счёт тангенциального размера, удельное давление на щётку поддерживалось постоянным. Наибольший ресурс щёток показали машины с щёточным перекрытием равным двум коллекторным делениям. При использовании непродороженных коллекторов уменьшение щёточного перекрытия приводит к увеличению износа.

В [33] за счёт проточки винтовой канавки на коллекторе достигнуто снижение износов щёток. Винтовая канавка снижает температуру щёток и коллектора.

В [51] снижение износа в коллекторных машинах переменного тока достигнуто смещением щёток с геометрической нейтрали по направлению вращения. В коллекторных машинах переменного тока магнитная система имеет большое насыщение. Смещение щёток приводит к уменьшению поперечной реакции якоря, а также появлению продольной реакции якоря, которая подмагничивает машину. При этом наиболее активное влияние на результирующий магнитный поток оказывает уменьшение размагничивающего действия поперечной реакции якоря и трансформаторной ЭДС в коммутируемой секции. Таким образом, в результате смещения щёток происходит увеличение результирующего магнитного потока, что вызывает снижение потребляемого тока и скорости вращения при постоянном тормозном моменте. Смещение щёток по направлению вращения приводит при

постоянстве нагрузочного момента к снижению износов щёток в среднем на 10% за счёт уменьшения электрической (снижение потребляемого тока) и механической (снижение частоты вращения) составляющих износа. Уровень искрения не изменяется.

В [27] исследованы различные способы снижения износа щёток в коллекторных машинах переменного тока. При замене сплошной щётки на разрезную износы остаются одинаковыми. Волочащаяся щётка позволяет увеличить ресурс на 30 - 40%. Замена марки щётки наиболее активно влияет на ресурс. За счёт подбора марки щётки ресурс по отношению к штатной щётке ЭГ-74 был увеличен в два раза. Повышение давления на щётки позволило значительно снизить износы (за счёт уменьшения уровня искрения).

В [26] проведена оценка эффективности снижения износов пропиткой электрощёток различными веществами. В качестве пропитывающих веществ использована суспензия фторопласта Ф-4Д, фторопластовый лак Ф-32ЛН и коллоидный графит. Процесс пропитки осуществлялся окунанием, погружением под вакуумом, ультразвуковой обработкой. Пропитке подвергались щеточные изделия ЭГ-74. Пропитка суспензией фторопласта Ф-4Д приводит к незначительному снижению износа щеток, характеристика износов имеет максимальное значение, при превышении которого эффективность снижается. Пропитка лаком Ф-32ЛН также приводит к снижению износа. Недостатком является необходимость длительной промывки поверхности щеточных изделий от пленки фторлака. Коллоидный графит - самый эффективный для снижения износов, который показал существенное снижение износа и уменьшение радиопомех на всех частотах. С увеличением времени наработки эффективность снижается.

В [115] предлагается создавать окисную пленку на металлических частях щеточно-коллекторного узла потоком озонированного воздуха, которая снижает скорость износа коллектора и улучшает распределение тока под щёткой. Недостатком способа является сильная коррозия всех металлических частей электродвигателя при температурах 17-20 °С.

В [14, 15] для создания ПП применяется пропитка щёток поверхностно-активными веществами (ПАВ).

В [3] для уменьшения износа щёток и коллекторов электродвигателей метрополитена предлагается применять жидкую смазку «эпилам». Недостатком способа является высокая химическая активность жидких смазок и технологические трудности в осуществлении такого вида смазки.

В [12] разработан способ увеличения срока службы электрощёток и контактных колец за счёт применения тефлонового покрытия в скользящем контакте.

Обладая большей эффективностью по сравнению с пропиткой электрощёток, твёрдые смазочные материалы в отличие от жидких легче ввести в зону электрического контакта, проще регулировать уровень подачи смазочного материала. Твёрдые смазочные материалы обеспечивают граничное трение. Граничный слой смазки толщиной от 0,1 мкм имеет свойства резко отличные от объёмных свойств жидкой смазки: он имеет определённо ориентированное молекулярное строение, обладает упругостью формы и высоким значением предельного напряжения сдвига [9, 88]. К граничному трению следует отнести трение при наличии плёнки твёрдых смазок графита, дисульфида молибдена, талька, нитрида бора, политетрафторэтилена и др. Для смазки контакта щётка-коллектор наиболее подходят дисульфиды и диселениды тугоплавких материалов.

Как показали исследования [79, 82] наилучшим результатом в снижении износа электрощёток обладает дисульфид молибдена. Дисульфид молибдена (ДМ) [19] (молибденит) - тёмный блестящий минерал по внешнему виду схожий с графитом. Количество ДМ в руде составляет всего 0,5%, поэтому наиболее рациональное получение ДМ синтетическим способом. ДМ - диэлектрик и только при определённых условиях может проявить свойства полупроводника. Электрическое сопротивление ДМ падает с увеличением напряжения в тонких плёнках. Появление проводимости в ДМ вызывается нагревом за счёт прохождения электрического тока и

электрического поля. Наличие слоёв двух различных атомов в структуре ДМ создаёт условия лёгкого скольжения. Плёнка толщиной 0,02 мкм может включать 40 слоёв или 39 поверхностей скольжения. Применение плёнок толщиной 5 мкм вполне достаточно для обеспечения нормального процесса трения.

Немалое влияние на антифрикционные свойства ДМ оказывает ориентация его частиц. От чистоты частиц порошка ДМ зависит коэффициент трения. Чистота порошка должна быть не менее 98,5%. Величина частиц порошка ДМ также влияет на коэффициент трения, чем тоньше порошок, тем выше его смазывающие свойства. Однако, величина частиц должна быть не меньше 1 мкм, так как при меньшей величине частиц порошок утрачивает смазывающие свойства.

ДМ характеризуется хорошей кроющей способностью, поэтому небольшого количества порошка достаточно для создания на поверхности трения слоя смазки. Для нормальной работы пар трения необходимо выбирать оптимальную толщину слоя смазки в зависимости от давления, скорости, температуры, чистоты поверхностей трения, метода нанесения плёнки.

Способность ДМ существенно снижать коэффициент трения и механический износ электрощёток отмечает большинство авторов. Вместе с этим, применение ДМ способствует уменьшению степени искрения под щётками, снижая ток щётки [93]. При высоких температурах, особенно при интенсивном искрении графит может сублимироваться, т.е. испаряться без перехода в жидкую фазу [121].

В [105] электрические свойства ДМ объясняются его строением. Тип проводимости в ряду дихалькогенидов переходных металлов IV-VI групп зависит от номера группы металлического атома, что связано с его акцепторной способностью. Поэтому, несмотря на похожие кристаллические структуры, дихалькогениды Mo и W, в том числе и MoS<sub>2</sub> – полупроводники, а дихалькогениды Nb и Ta обладают металлической проводимостью. Электропроводимость ДМ как и у других дихалькогенидов W и Mo изменяется

в широких пределах из-за неконтролируемых примесей. Поэтому технологические параметры получения  $\text{MoS}_2$  оказывают существенное влияние на величину электропроводности. У ДМ существует кристаллографическая анизотропия электропроводности. В направлении параллельном оси кристалла  $\sigma = 4,6 \times 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ , а в перпендикулярном направлении  $\sigma = 7,8 \times 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  [101].

Одним из факторов, ограничивающих применение ДМ в токосъёмном узле электрической машины, является его температурная неустойчивость [98]. При превышении определённых температур ДМ переходит в оксид молибдена  $\text{MoO}_3$ . Температура перехода в оксид для частиц ДМ 7 мкм равна  $400^\circ\text{C}$ , с увеличением размера частиц она увеличивается, но с увеличением размера частиц снижаются смазывающие свойства ДМ. Оксид ДМ обладает абразивными свойствами, что вызывает существенное увеличение износа электрощёток. В электрических машинах, предназначенных для работы в высотных условиях из-за высоких температур применяют крупнозернистый (140 мкм) ДМ.

На смазывающую способность влияет толщина нанесённой плёнки. Толщина плёнки определяется размерами кристаллов, способом нанесения ДМ на подложку, и может составлять 2-5 мкм при размере кристаллов 0,8 мкм;  $3 \cdot 10^{-3}$  мкм при размере кристаллов 2 мкм [101].

Существует несколько способов нанесения твёрдой смазки на поверхности скольжения:

- натирание поверхности порошком или брикетом твердой смазки [112];
- напыление покрытия твердой смазки пульверизацией раствора, представляющего собой суспензию твердой смазки с органическим веществом или пропитка пористой поверхности раствором, содержащим твердую смазку [127];
- катодное напыление чистой твердой смазки [127];
- внедрение твердой смазки при изготовлении деталей трения методами порошковой металлургии [98];

- химико-термическая обработка деталей в среде твердой смазки [15].

Способ нанесения твёрдой смазки выбирается в зависимости от условий эксплуатации. У каждого из способов имеются свои достоинства и недостатки в технологическом плане, а также в механических и электрических свойствах получаемых плёнок.

В [24] износ щёток в коллекторном двигателе переменного тока насоса «Кама» уменьшается за счёт установки в дополнительный щёткодержатель щёток на основе дисульфида молибдена. Износ токоведущих щёток при искрении 2 балла уменьшился на 20%.

В [31] износ щёток (на продороженном коллекторе) коллекторного двигателя переменного тока МШУ-2,2-230 за счёт установки смазывающей щётки (СЩ), выполненной на основе ДМ, уменьшился в два раза.

В [32] за счёт подбора марки щётки и установки СЩ, выполненной на основе дисульфида молибдена ресурс токоведущих щёток был увеличен в три раза, отмечается снижение уровня радиопомех, рабочие характеристики практически не изменяются. Применение СЩ на непродороженных коллекторах приводит к возрастанию износов токоведущих и СЩ.

Таким образом, наиболее эффективное снижение износа щёток можно достичь путём подбора марки щётки и способом создания на коллекторе плёнки дисульфида молибдена.

### **1.3 Проблема износа токоведущих щёток в электрических машинах, работающих в высотных условиях**

Электрооборудование, устанавливаемое на самолетах, работает в гораздо более тяжелых эксплуатационных условиях, чем аналогичные системы наземного назначения. С увеличением высоты снижается плотность воздуха, его давление и температура; изменяется влажность. За пределами тропосферы добавляется влияние озона и солнечной радиации [7, 20]. Работа токосъёмного узла в вакууме осложняется рядом физических процессов, из которых



определяющий ресурс работы и надёжность являются изменение процессов трения и износа.

Снижение плотности воздуха вызывает уменьшение его электрической прочности. На больших высотах ухудшается процесс гашения электрической дуги, что приводит к увеличению искрения на коллекторах электрических машин [99]. Снижение плотности воздуха уменьшает его способность отводить тепло. С высоты 6 километров резко уменьшается количество водяного пара в воздухе, это влечет увеличение трения и износа щеток электрических машин. При быстром наборе высоты часть парообразной влаги конденсируется и выпадает в виде росы. Влага приводит к коррозии металлов и образованию токопроводящих дорожек на электрической изоляции. На высотах более 12 километров образуется озон в результате воздействия ультрафиолетовой радиации на кислород воздуха. Будучи сильным окислителем, озон делает хрупким или разрушает материалы органического происхождения. Температура электроагрегата зависит от температуры окружающей среды, теплового излучения соседних агрегатов, и тепла, выделяемого током, проходящим через электроагрегат. В тропосфере (до высоты 10...15 км) температура убывает в среднем на  $6,5^{\circ}\text{C}$  на 1 км. В стратосфере до высоты 30...35 км температура постоянна и равна  $-56,5^{\circ}\text{C}$ , затем повышается и на высоте 50...55 км достигает до  $0^{\circ}\text{C}$ . Поэтому воздух в малой степени влияет на повышение температура самолета. При большой скорости полета имеет значение аэродинамический нагрев, который зависит от высоты полета.

Необходимость управления износом особенно важна вследствие увеличения износа щёток в высотных условиях по сравнению с износом в нормальных атмосферных условиях при неизменности электрических параметров работы машины [84].

И.В. Крагельский [85] небольшой износ графита в атмосферных условиях объясняет переносом микрочастиц графита с одного трущегося элемента на другой и обратно. В вакууме химическое взаимодействие и образование ПП,

обладающей смазывающим действием, осложнено явлениями диссоциации и испарениями, особенно при ужесточении режимов трения.

На высоте более 10 тыс. метров наблюдается возрастание износа угольных щёток, работающих без токовой нагрузки в 500-1000 раз и повышение коэффициента трения до 0,35-1,00 /43/. Отмечено также обильное распыление тонких частиц размером 0,1-0,3 мкм в вакууме  $10^{-2}$  мм рт.ст. Причиной интенсивного износа графитовых и металлографитовых электрощёток в вакууме называется особенность окружающей атмосферы, вызывающей изменения условий трения элементов электрического скользящего контакта, а также механическими факторами [20].

В вакууме величина переходного падения напряжения имеет тенденцию к снижению, что объясняется разрушением ПП и отсутствием окисляющих факторов среды. Во время работы в вакууме, когда происходит переход от граничного к «чистому» трению, коэффициент трения может возрасти в 3-5 и более раз, а износ щёток - в десятки и даже сотни раз.

В высоком вакууме коммутающие свойства щёток ухудшаются по следующим причинам:

- снижается величина переходного падения напряжения;
- увеличивается температура контактной зоны;
- происходит переход от ионизации воздушного промежутка к ионизации и эрозионному разрушению электродов (щёток и ламелей);
- увеличение скачков трения обезгаженной контактной пары приводит к вибрациям и искрению.

По данным Хольма [118] в вакууме  $10^{-4}$  мм. рт.ст. коэффициент трения повышается не только для пары графит-медь, но и для пары графит-золото вследствие уменьшения прилипания плёнки графита к золоту в вакууме по сравнению с влажным воздухом, сваривание контактных поверхностей при этом не наблюдалось.

Повышенный износ в сухом воздухе и вакууме на высоте 6000-15000 м. объясняется Р. Хольмом [119] усиленным сцеплением графитовых чешуек щётки

и политуры и слабой связью их с медью или серебром. В атмосферных условиях молекулы воды, увеличивая расстояние между скользящими чешуйками и уменьшая тем самым вандерваальские силы, облегчают скольжение. Кроме того, молекулы воды исключают сцепление, возникающее за счёт свободных валентностей на краях графитовых моноплоскостей. Тонкая плёнка воды обеспечивает плавное скольжение без скачков, однако при определённой толщине плёнки контакт теряет проводимость.

Некоторые исследователи увеличение износа щёток в высотных условиях объясняют разрушением ПП. ПП не обладает смазывающей способностью, но она предотвращает непосредственное схватывание трущихся материалов. Также плёнка косвенно влияет на износ щёток, так как при её исчезновении ухудшается коммутация. Образование и разрушение окисной плёнки на медном коллекторе является динамическим процессом, при прохождении тока постоянно возникают места пробоя окисной плёнки. В высотных условиях снижение содержания кислорода и влаги сдвигает равновесие образования и разрушения в сторону разрушения ПП. Наличие слоя влаги на окисных и графитовых участках поверхности коллектора обуславливает гидродинамические условия трения. При снижении содержания влаги в окружающей атмосфере снижается толщина водяной плёнки, возникают условия «сухого» трения, происходит дезориентация частиц графита и увеличение износа [126].

Таким образом, высокий износ электрощёток в высотных условиях связан с изменениями структуры ПП, возникающими при снижении содержания в окружающей среде паров влаги и кислорода, а именно с ухудшением антифрикционных свойств графита и разрушением медноокисных слоёв на поверхности коллектора.

#### 1.4 Способы снижения износа токоведущих щёток в электрических машинах, работающих в условиях вакуума

Большой износ щёток в условиях повышенных высот возникает вследствие отсутствия плёнки в контакте между щётками и коллектором. В результате этого происходит образование значительных сил связи металла и графита и, как следствие, наволакивания металла, задиры, повышенный износ и слабая электропроводность [130].

Для снижения износа щёток в вакууме необходимо навести на коллекторе ПП. Основной задачей является снижение износов щёток за счёт ускоренного образования ПП.

В [13] приведены результаты исследования структуры и электрического сопротивления отдельных участков плёнок на медном и серебряном коллекторе, образованных щётками с добавками синтезированных халькогенидов переходных металлов V группы периодической системы Д.И. Менделеева ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{NbS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ), а также квазибинарными сплавами ( $\text{WNbS}_2$ ,  $\text{MoNbS}_2$ ), которые кроме высоких антифрикционных свойств имеют низкое электрическое сопротивление (около  $10^{-3}$ -  $10^{-4}$  Ом·см) при нормальном и пониженном атмосферном давлении. Нижнее значение сопротивления коллекторных плёнок щёток, содержащих 75%  $\text{MoS}_2$  и 25% Cu, 75%  $\text{WNbS}_2$  и 25% Si практически совпадают, однако сопротивление  $\text{MoS}_2$  на 5-6 порядков выше, чем  $\text{WNbS}_2$ . В вакууме при плотностях тока 0,05 и 0,10 А/мм<sup>2</sup> верхнее значение сопротивления плёнок с  $\text{WNbS}_2$  значительно выше, чем у плёнок, образованных щётками, содержащими ДМ.

Вольтамперные характеристики участков плёнок, которые образованы щётками с  $\text{WNbS}_2$  имеют линейный характер и не зависят от полярности приложенного напряжения. Проводимость в таком случае с низким (до единиц Ом) сопротивлением, является металлической. Вольтамперные характеристики участков плёнок, содержащих ДМ, носят нелинейный характер. При увеличении напряжения, приложенного к контакту, до 1 В наблюдается уменьшение сопротивления примерно на порядок (с 1000 до 100 Ом). При

дальнейшем повышении напряжения существенное воздействие на проводимость плёнок оказывает значение протекающего тока. Для повышения электропроводности ДМ применяется замещение части атомов молибдена ниобием или танталом, которые играют роль акцепторных примесей. Количество легирующих примесей для изменения характера электропроводности составляет 5% [105]. В результате этого проводимость из полупроводниковой становится металлической. Однако, стоимость такого композиционного материала достаточно высока. Стоимость дисульфида вольфрама, встречающегося в природе, в 27 раз выше стоимости ДМ [98].

Для создания контактной плёнки, обеспечивающей нормальное скольжение в высоком вакууме, одного графита недостаточно, необходимы добавки специальных веществ, способствующих ослаблению металлических связей. Для этого применяется ряд химических веществ, имеющих слоистую структуру подобно графиту или иную структуру (карбонат лития). Дисульфид молибдена, карбонат лития, галоидные соединения металлов группы 2а, а также сульфиды, селениды и теллуриды переходных металлов обладают свойствами, обеспечивающими скольжение в условиях высокого вакуума за счёт образования контактной плёнки.

При изменении состава окружающей среды в высотных условиях, изменение условий трения определяет износостойкость и электротехнические характеристики щётчного контакта. При работе в вакууме коэффициент трения материалов, содержащих ДМ, снижается по сравнению с испытаниями на воздухе. Смазывающие свойства ДМ определяется только его составом и структурой кристаллической решётки и, в отличие от графита, не зависят от окружающей среды. Для обеспечения минимального износа при скольжении графита требуется присутствие атомов воды между плоскостями скольжения, а для ДМ этого не требуется

Джонсон и Ван [105] объясняли высокую смазочную способность дисульфида молибдена в вакууме «трибо-крекингом» дисульфида молибдена с образованием аморфной серы, имеющей малое сопротивление срезу.

Единой теории исследования механизма смазочного действия графита и других твёрдых антифрикционных материалов, нашедших применение в технологии изготовления электрощёток, работающих в сложных условиях, включающих высокий вакуум и предельные температуры нет. Существуют только отдельные представления, накопленные в результате экспериментальных исследований и используемые при практическом подборе твёрдых смазывающих добавок в щётки.

Брег [124] выдвинул для графита и ДМ структурную теорию, в которой смазочные свойства объясняются большими расстояниями между атомами углерода, расположенными в соседних слоях, и малыми расстояниями между атомами, расположенными внутри слоя. Это облегчает относительное скольжение слоёв внутри кристалла графита. В других исследованиях [126] лёгкое смещение слоёв графита и дисульфида молибдена объясняется дефектами в их структуре, ослабляющими связи между слоями. Недостатком структурной теории является невозможность объяснения работы смазок в газовых средах. Также известны вещества со слоистой структурой, которые имеют высокий коэффициент трения [10].

Абсорбционная теория (поглощение вещества из газообразной или жидкой среды всей массой другого вещества) предполагает доминирующее влияние сил абсорбции на смазочные свойства твёрдых смазок [9]. Известны вещества, которые, обладая слоистой структурой, имеют высокий коэффициент трения.

Севидж [100] пришёл к выводу, что различие в смазочной способности графита в присутствии газовых сред объясняется хемосорбцией атомами графита, расположенными по углам кристаллической решётки, атомов кислорода и физической абсорбцией атомами углерода, расположенными по плоскостям спайности, паров воды и других жидких веществ. За счёт этого облегчается сдвиг между плоскостями спайности и, следовательно, между слоями. При повышении температуры свойства твёрдых смазок улучшаются, что не могут объяснить абсорбционная и структурная теории.

Структурно-химическая теория [123] различает режимы трения твёрдых смазок. В лёгких режимах трения (малой нагрузки, скорости, невысокие температуры) смазочная способность обусловлена в основном структурными свойствами смазки. В средних режимах трения происходит переход граничного трения, при котором абсорбция поверхностно-активных веществ в тонком слое исключает явление схватывания. В тяжёлых режимах (по нагрузке, скорости и температуре) наступает схватывание отдельных микровыступов, скачкообразное трение и повышение температуры контактной зоны.

В работах [113] отмечено улучшение смазочных свойств графита, работающего в атмосферных условиях. При трении в вакууме графит ведёт себя как абразив, т.е. его смазочная способность зависит от содержания примесей окружающей среды [17], что согласуется с абсорбционной теорией. Однако, результаты некоторых работ [125, 88] противоречат этой теории. Кроме того, абсорбционная и структурная теории не могут объяснить улучшение смазочных свойств твёрдых смазок при повышенных температурах, а также улучшение фрикционных свойств дисульфида молибдена в вакууме.

В [20] рассмотрен механизм прохождения тока в атмосферных условиях и на больших высотах в электрощётках с неравномерным расположением смазывающих добавок на основе ДМ и серебра. Показано, что в условиях больших высот основной рабочий ток проходит через контактную поверхность щёток, имеющих смазочные добавки.

В [22] представлены результаты сравнительных исследований смазочных свойств диффузионных покрытий из ДМ со смешанной и гексагональной структурой. В исследованиях удалось исключить влияние температурного фактора, поскольку образцы с той и другой структурой изготовлены при одинаковой температуре. Результаты исследований показывают преимущества покрытия со смешанной структурой, которая обеспечивает меньший коэффициент трения.

В [80] приводятся сведения о материале для скользящих контактов, в состав которого входят серебро, ДМ и медь, где серебро применяется для

увеличения электропроводности, дисульфид молибдена – для обеспечения смазывающей способности, а медь и молибден – для повышения твёрдости серебра и улучшения характеристики износа щёток и улучшения обрабатываемости. Испытания проводились на скользящем узле «щётка-контактное кольцо» в условиях вакуума.

В [21] приведены результаты исследований работоспособности деталей трения из материала М-8014 (молибден с покрытием из ДМ) в паре с технически чистым молибденом в вакууме при температурах до +800 °С и на воздухе при номинальной температуре. Отмечается улучшение фрикционных характеристик покрытия в вакууме и с повышением температуры.

В [97] в качестве твёрдой смазки предлагается использовать фторуглерод. Фторуглерод является неплавким, нерастворимым неорганическим полимером с низким коэффициентом трения, высокой термостабильностью, химической стойкостью и слоистой структурой. Он может быть применён в виде твёрдой смазки или в качестве присадки к маслам. Из фторуглерода можно получить адгезионную пленку толщиной до 1 мкм путем простого натирания на подложку. При этом обеспечивается более низкий коэффициент трения и более продолжительный срок службы чем при использовании графита, а также повышается теплостойкость и механическая стойкость деталей при повышенных давлениях.

На смазочные свойства плёнок ДМ влияет химический состав и твёрдость подложки [122]. Скорость изнашивания плёнки и её адгезия зависит от микрогеометрии поверхности подложки [110]. На износ плёнки влияет также шероховатость поверхности контртела [122].

Натирание поверхности брикетом твёрдой смазки реализовано в щётке ВТ–5 применяемой в авиации [114] или её модификации [89]. В щётке ВТ–5 ДМ со связующим расположен в виде стержней в теле щётки. Так как при введении в щётку смазывающих стержней изменяется поперечное сечение токопроводящего материала щетки, то в стержни вводился порошок серебра. Добавление порошка серебра также позволяет уменьшить поперечное сечение



щетки. Недостатком такой конструкции является появление кольцевой выработки на коллекторе под вставками ДМ [89]. Появление выработки обусловлено разницей проводимости перехода «щётка-коллектор» у стержней и самого тела щётки. Из-за разных коэффициентов трения тела щётки и вставок из ДМ возможно зависание щётки на стержне, в этом случае процесс токопередачи будет определять сам стержень, подвергаясь влиянию искрения. Под влиянием искрения, если температура будет более 400°C, ДМ будет переходить в оксид, теряя свои смазывающие свойства.

Среди модификаций данного способа существуют варианты с другим способом расположения стержней и их количеством. Недостатком всех подобных конструкций является наличие кольцевой выработки на коллекторе, а также разные коэффициенты трения щёток и стержней. Кроме того, формирования твёрдосмазочного покрытия находится под влиянием электрических полей, искрения и значительных перегревов. Исследования [79] показали, что уменьшение износа при применении данной щетки невелико.

Пропитка пористой поверхности раствором, содержащим твёрдую смазку, осуществлена в щётке Г-27, в тело которой ДМ введен в виде гранул или порошка (щетка ВТ-3). Недостатком использования таких щёток является сильный износ коллектора [79], что вызвано переходом ДМ в оксид под действием высоких температур в зоне контакта.

Внедрение ДМ при изготовлении электрощёток методами порошковой металлургии не дает эффекта уменьшения износа, однако увеличение переходного падения напряжения не отмечалось [72, 74].

В [27] введение твёрдой смазки в зону контакта предлагается осуществлять установкой дополнительной СЩ на коллектор. По данным экспериментов на различных типах коллекторных машин показала, что износ электрощеток уменьшается в 3 раза в наземных условиях и до 12 раз в условиях высоты.

Дополнительная щетка, изготовленная на основе ДМ, наносит на коллектор смазывающий слой, уменьшающий коэффициент трения пары щетка

- коллектор. Помимо смазывающего действия ДМ внедряется в материал щетки, заполняя ее поры. Уменьшение износа щеток тем эффективнее, чем тверже материал коллектора. Существует оптимальное давление на дополнительную щётку, при котором износ токоведущих щёток минимален, при этом минимальный износ токоведущих щёток не совпадает с минимумом износа дополнительных щёток из ДМ [34]. При оптимальном давлении на дополнительные щётки износ токоведущих щёток уменьшался в 2-4 раза.

Данная конструкция, с точки зрения уменьшения износов электрощеток, является на сегодняшний день самой перспективной. В связи с тем, что, в указанной конструкции электрический ток проходит лишь через слой смазки, а не через весь брикет дисульфида молибдена. Во-вторых, в экстремальных режимах работы, связанных со значительным искрообразованием, не будет происходить окисления твердой смазки. Поэтому все исследования, выполненные в настоящей работе, проведены с описанными техническими решениями.

Таким образом, для снижения износов электрощёток в вакууме, в отличие от наземных условий, стоит задача наведения на коллекторе или контактных кольцах ПП. Наибольший эффект по снижению износов получается при применении дополнительных щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена.

## **Выводы по главе 1**

Анализ литературы, посвящённой износу щёток электрических машин в нормальных и высотных условиях показал наличие проблемы в определении процессов, происходящих в зоне контакта. Однако основными показателями качества скользящего контакта можно назвать износ щёток и переходное падение напряжения. Резкое увеличение износа щёток в высотных условиях делает необходимым применение средств для снижения износов. Наиболее эффективным из представленных способов снижения износов как в нормальных, так и в высотных условиях является применение твёрдых смазок, в частности дисульфида молибдена. Применение твёрдых смазок как присадок к электрощёткам или внедрение их в тело щётки малоэффективно по сравнению с установкой твёрдой смазки в виде отдельной СЩ.

## **ГЛАВА 2. СНИЖЕНИЕ ИЗНОСА ТОКОВЕДУЩИХ ЩЁТОК В КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В ВЫСОТНЫХ УСЛОВИЯХ**

### **2.1 Влияние политурной плёнки на износ токоведущих щёток в электрических машинах постоянного тока, работающих в высотных условиях**

Работа двигателей предназначенных для эксплуатации в высотных условиях характеризуется повышенным износом щёток, что связано, как известно, с уменьшением содержания влаги и кислорода в атмосфере [87]. Двигатели имеют герметизированное исполнение. Для выравнивания атмосферного давления и давления внутри двигателя у большинства герметизированных двигателей имеется дренажное отверстие закрытое сеткой. У некоторых двигателей дренаж отсутствует. Повышенный износ щёток приводит к снижению сопротивления изоляции и необходимости ремонта двигателя. Для снижения износа щёток разработаны специальные марки, имеющие добавки, снижающие коэффициент трения: олово, свинец (МГС-7) и т.д. Особое место занимают щётки, у которых в щёточную массу добавляется порошок дисульфида молибдена (ДМ) (ДМС-140) (ВТ-3, ВТ-10, Г-20, Г-27 и т.д.). Недостаток этих щёток состоит в том, что процент ДМ в структуре щёток ограничен технологией её изготовления, что препятствует созданию оптимального значения толщины смазывающей плёнки, которая для различных марок щёток различна [94]. Кроме того, под действием дугового искрения сбегавшего края щётки ДМ, распределённый не равномерно в теле щётки, может перейти в оксид, который является абразивом и при относительно малом износе щёток появляется повышенный износ коллекторов [109]. Для того, чтобы повысить эффективность применения ДМ нами было предложено изготавливать отдельную нетокопроводящую смазывающую щётку (СЩ) из ДМ со связующим. СЩ устанавливается в отдельный щёткодержатель или в карман конструктивно соединённый с токоведущим щёткодержателем на

рабочую дорожку коллектора (рис. 2.1). В опытах использовались двигатели без дренажа мощностью 5 Вт, двигатели остальных мощностей были с дренажом.

На начальной стадии нами рассмотрено влияние политурной плёнки (ПП) на износ токоведущих щёток при работе двигателя в высотных условиях.

Для оценки влияния содержания кислорода и влаги в окружающей среде на сопротивление ПП и износ щёток в герметизированных двигателях препарировалось шесть герметизированных двигателей мощностью 5 Вт (вырезано два окна для визуальной оценки искрения при работе в нормальных условиях; окна при необходимости закрывались герметичными заглушками; между токоведущими щётками поставлен штатный щёткодержатель, в который при необходимости ставились датчики для замера сопротивления ПП). Двигатели испытывались совместно с редуктором при работе под нагрузкой. До начала экспериментов притирались исследуемые щётки до получения 100% контактной поверхности. Затем снималась ПП, щётки взвешивались на аналитических весах и двигатели работали 150 циклов в нормальных климатических условиях, после чего определялся износ щёток и сопротивление ПП с помощью датчика, установленного в дополнительный щёткодержатель [69]. Затем одна пара двигателей отработывала - 100 циклов в термобарокамере с температурой  $t=+120^{\circ}\text{C}$ , давлением  $P=15\text{мм.рт.ст.}$ . В конце режима измерялся износ щёток (износ щёток рассчитывался через их удельный вес) и сопротивление ПП (принято допущение, что сопротивление ПП характеризует её толщину). По аналогичной методике испытывались оставшиеся двигатели. Вторая пара отработала в термобарокамере 200 циклов, а третья – 300.

В таблице 2.1, рис. 2.3 и 2.4 представлены усреднённые результаты сопротивления ПП и износа токоведущих щёток по двум двигателям после испытательных режимов.

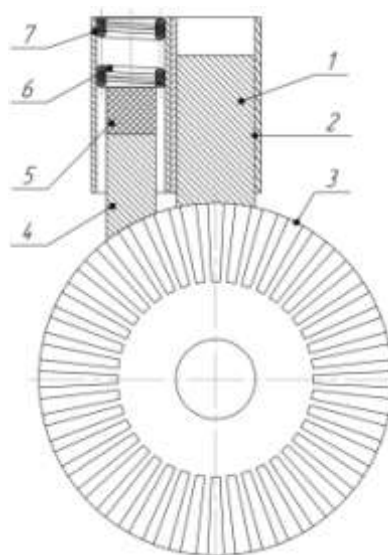


Рис. 2.1 Установка СЩ в карман с токоведущим щёткодержателем

1 – токоведущая щётка; 2 – щёткодержатель токоведущей щётки; 3 – коллектор;  
4 - смазывающая щётка; 5 – несущая часть СЩ; 6 – пружина СЩ; 7 – карман для СЩ

Таблица 2.1 - Сопротивление ПП и износ токоведущих щёток двигателя мощностью 5 Вт с открытыми смотровыми окнами

Начальное сопротивление политурной плёнки, Ом	Нормальные Условия		Режим работы термобарокамеры: $t=+120 \pm 3^\circ\text{C}$ , $P=15 \pm 1\%$ мм.рт.ст.					
	Число рабочих циклов: 150		Число рабочих циклов: 100		Число рабочих циклов: 200		Число рабочих циклов: 300	
	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, $\text{мм} \cdot 10^{-3}$	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, $\text{мм} \cdot 10^{-3}$	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, $\text{мм} \cdot 10^{-3}$	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, $\text{мм} \cdot 10^{-3}$
0,02	0,821	7,52	1,12	39,27	-	-	-	-
0,02	0,812	8,36	-	-	1,45	68,78	-	-
0,02	0,759	8,36	-	-	-	-	1,79	111

Как следует из таблицы 2.1 и рисунка 2.3 (разгерметизация за счёт снятия заглушки на смотровых окнах двигателя), по мере наработки в термобарокамере с давлением 15 мм.рт.ст. наблюдается увеличение сопротивления ПП по отношению к нормальным условиям. Повышенный износ щёток по отношению к нормальным условиям в этом случае можно объяснить

только эффектом сухого трения, которое возникает из-за уменьшения содержания паров воды в окружающей атмосфере.

Результаты аналогичных испытаний четырёх герметизированных двигателей мощностью 5 Вт (был только установлен дополнительный щёткодержатель) приведены в таблице 2.2, рис. 2.3 и 2.4. Работа двигателей в термобарокамере характеризуется снижением сопротивления ПП и повышением износов щёток в 2,7 раза относительно предыдущих результатов. Полученный эффект можно объяснить тем, что при работе в термобарокамере повышенная герметизация двигателя приводит к снижению содержания кислорода внутри двигателя за счёт его сгорания под действием искрения, что приводит к смещению динамического процесса истирания и образования ПП в сторону уменьшения её толщины, вызывая более интенсивный износ щёток.

Таблица 2.2 - Сопротивление ПП и износ токоведущих щёток герметизированных двигателей мощностью 5 Вт

Нормальные условия		Режим работы термобарокамеры: t=+120°C ±3°C, P=15±1% мм.рт.ст.							
Число циклов: 150		Число циклов: 50		Число циклов: 100		Число циклов: 150		Число циклов: 200	
Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 <sup>-3</sup>	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 <sup>-3</sup>	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 <sup>-3</sup>	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 <sup>-3</sup>	Сопротивление политурной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 <sup>-3</sup>
0,779	5,57	0,657	66	-	-	-	-	-	-
0,755	5,45	-	-	0,564	109	-	-	-	-
0,768	5,49	-	-	-	-	0,493	200	-	-
0,775	5,57	-	-	-	-	-	-	0,384	225

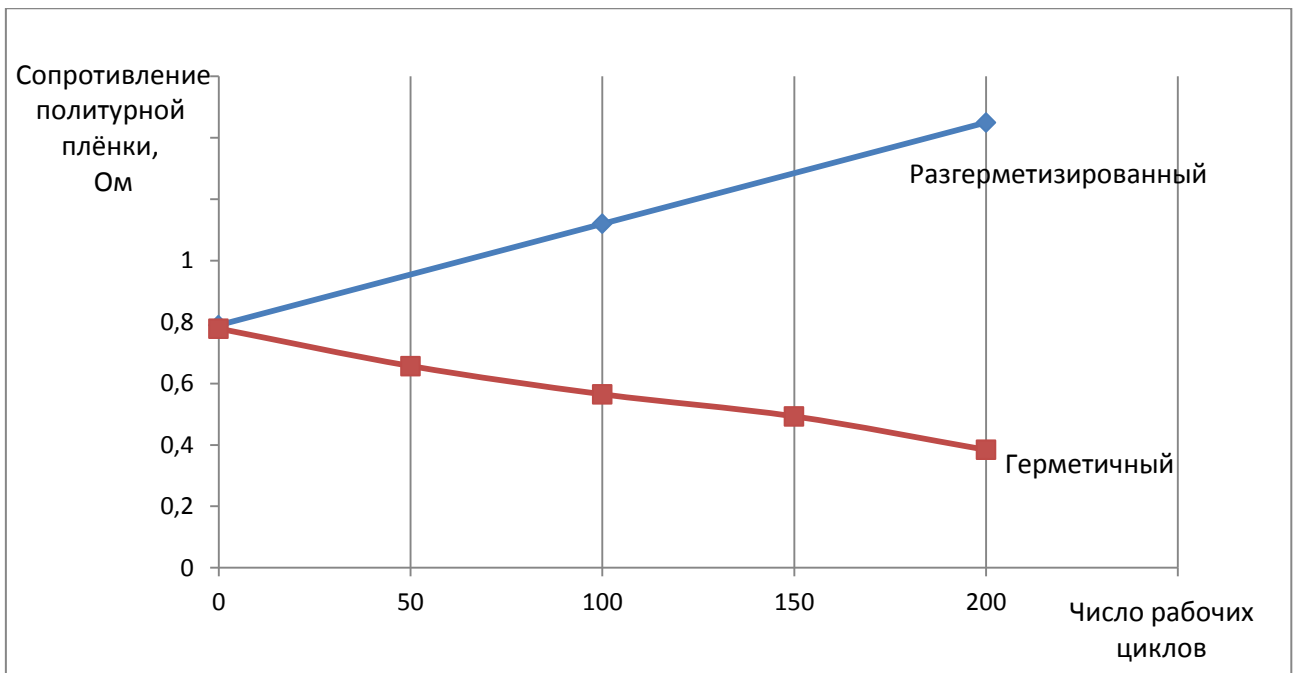


Рис. 2.3. Сопротивление ПП герметизированного и разгерметизированного двигателей (режим работы термобарокамеры:  $t=+120^{\circ}\text{C}$ ,  $P=15$  мм.рт.ст.)

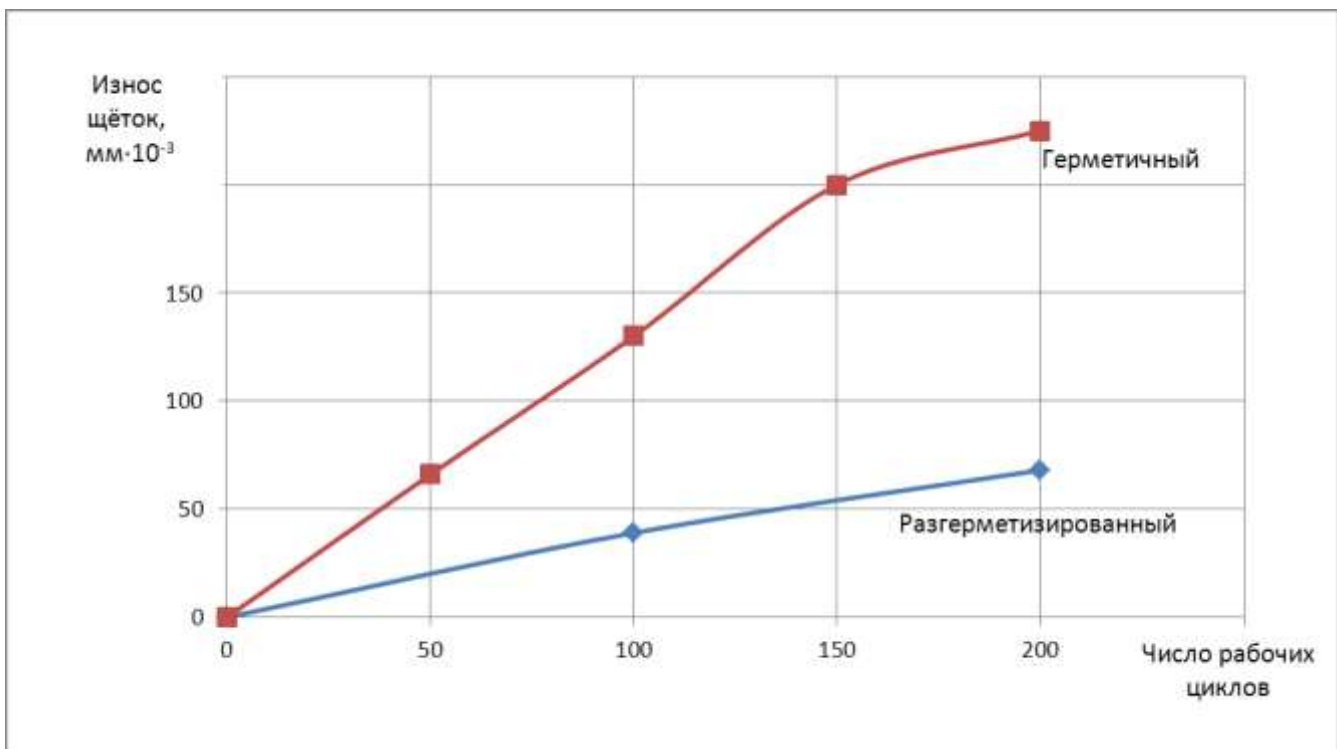


Рис. 2.4. Износ щёток герметизированного и разгерметизированного двигателей (режим работы термобарокамеры:  $t=+120^{\circ}\text{C}$ ,  $P=15$  мм.рт.ст.)

Степень искрения в опытах оставалась приблизительно постоянной (не более 1 ½ балла) и замерялась прибором контроля коммутации электрических машин ПКК-5 [117]. Прибор ПКК-5 предназначен для оценки степени искрения



щёток коллекторных электрических машин в стационарных режимах по сигналу с разнополярных щёток. Внешний вид и схема подключения прибора показана на рисунке 2.5.

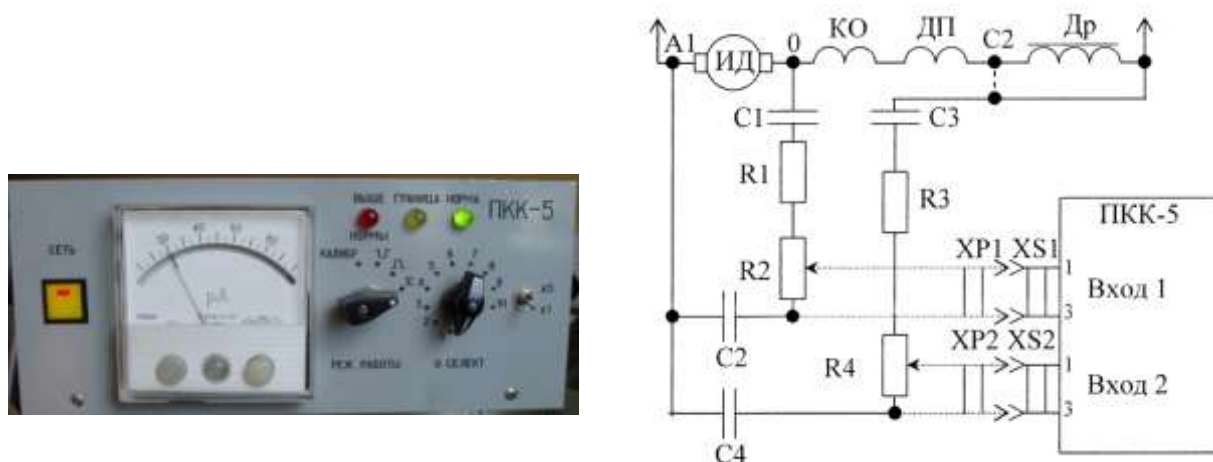


Рис. 2.5. Внешний вид и схема подключения прибора ПКК-5

Прибор ПКК-5 усредняет импульсы дуговых разрядов либо отдельно от недо- или перекоммутированных секций обмотки якоря, либо суммарные и фиксирует результат стрелочным индикатором. Соответствие показаний индикатора баллам ГОСТ 183-74 устанавливается методом экспертных оценок по видимому искрению.

Таким образом, при работе в высотных условиях износы щёток в случае герметизированного двигателя увеличиваются не только за счёт снижения содержания влаги в окружающей среде, но и снижения кислорода в воздухе, что приводит к уменьшению толщины ПП и повышенному износу щёток.

## 2.2 Влияние материала коллектора на износ токоведущих щёток

Для проверки влияния материала коллектора на износ токоведущих щёток, были проведены исследования трёх герметизированных двигателей постоянного тока мощностью 2,5 Вт у которых на корпусе имелся дренаж закрытый сеткой с коллекторами из меди, кадмиевой и хромовой бронз и токоведущими щётками Г-21А (таблица 2.4). Исследовательский цикл включал их работу в нормальных условиях и в высотных (давление 15 мм.рт.ст.) в

сочетании с температурами +85°C и -60°C, с замером суммарного износа щёток (число циклов по каждому режиму одинаково).

Таблица 2.4 - Износ щёток электродвигателя мощностью 2,5 Вт с разными материалами коллекторов

№ п/п	Условия опыта	Суммарный износ щёток по исследовательскому циклу (нормальные + высотные условия p=15мм.рт.ст. t=+85°C, -60°C), мм·10 <sup>-3</sup>
1	Щётки Г-21А, коллектор из меди.	44,4
2	Щётки Г-21А, коллектор из кадмиевой бронзы.	36,2
3	Щётки Г-21А, коллектор из хромовой бронзы.	25,6

Наибольший суммарный износ щёток наблюдается у якоря с коллектором из меди (в 1,7 раза по отношению к хромовой бронзе), наименьший – на коллекторе из хромовой бронзы.

### **2.3 Влияние установки смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена, на износ токоведущих щёток**

Из результатов п. 2.1, износ щёток электрических машин, предназначенных для работы в высотных условиях может быть уменьшен за счёт снижения коэффициента трения щётка-коллектор путём установки СЩ, выполненных на основе ДМ.

В таблице 2.5 представлены результаты эффективности использования СЩ в герметизированном электродвигателе мощностью 5 Вт у которого в дополнительный щёткодержатель была поставлена СЩ. Применение СЩ снижает износ токоведущих щёток при работе в термобарокамере с температурами +120°C и -60°C, при давлении 15 мм.рт.ст. соответственно в 5 и 7 раз. При работе в нормальных условиях износ снижается в 1,5 раза. В таблице 2.6 представлены результаты по оценке влияния СЩ на

характеристики испытуемого двигателя, работающего в составе механизмов с щётками МГС-7 и Г-21А в нормальных условиях и термобарокамере.

Установка СЩ (одна СЩ на две токопроводящие) приводит к максимальному увеличению потребляемого тока до 13% и времени поворота вала механизма до 12%, однако параметры двигателей соответствуют ТУ на их поставку.

Таблица 2.5 - Износ токоведущих щёток электродвигателя мощностью 5 Вт при установке смазывающей щётки

Условия опытов	Марка щёток	Режим работы термобарокамеры		
		Нормальные условия	$t=120\pm 3^{\circ}\text{C}$ , $p=15$ мм.рт.ст.	$t=-60\pm 3^{\circ}\text{C}$ , $p=15$ мм.рт.ст.
		Износ щёток за испытательный цикл, мм·10 <sup>-3</sup>		
Смазывающей щётки нет	Г-21А	9,74	12,18	80,4
Установлена смазывающая щётка	Г-21А	6,09	2,43	10,95

Таблица 2.6 - Сравнительные характеристики герметизированного двигателя мощностью 5 Вт при установке смазывающей щётки

Условия опытов	Напряжение питания, В	Ток через щётки, А		Время поворота вала механизма, с	
		Правое вращение	Левое вращение	Правое вращение	Левое вращение
Щётка МГС-7					
Нормальные условия $t=+120\pm 3^{\circ}\text{C}$ , $p=15$ мм.рт.ст. $t=-60\pm 3^{\circ}\text{C}$ , $p=15$ мм.рт.ст.	27	<u>0,74</u> 0,77	<u>0,74</u> 0,79	<u>8,03</u> 8,68	<u>8,08</u> 8,18
		<u>0,73</u> 0,76	<u>0,71</u> 0,75	<u>8,76</u> 9,22	<u>8,69</u> 9,18
		<u>0,7</u> 0,76	<u>0,66</u> 0,75	<u>8,48</u> 9,22	<u>8,12</u> 9,18
Щётка Г-21А					
$t=+120\pm 3^{\circ}\text{C}$ , $p=15$ мм.рт.ст. $t=-60\pm 3^{\circ}\text{C}$ , $p=15$ мм.рт.ст.	27	<u>0,62</u> 0,65	<u>0,63</u> 0,65	<u>8,38</u> 9,45	<u>8,5</u> 9,92
		<u>0,61</u> 0,66	<u>0,61</u> 0,64	<u>8,18</u> 9,33	<u>8,23</u> 9,16

Примечание: числитель – характеристики двигателя без смазывающей щётки;  
знаменатель – характеристики двигателя при установке смазывающей щётки.

В таблице 2.7 представлены результаты снижения износов токоведущих щёток в случае установки СЩ при разных материалах коллектора двигателя мощностью 2,5 Вт. Установка СЩ при материалах коллектора медь, кадмиевая

и хромовая бронза, уменьшает износы штатных щёток соответственно в 2,4; 3,4 и 5,7 раз (относительно штатного коллектора, изготовленного из меди; давление на СЩ было одинаковым).

Таблица 2.7 - Износ токоведущих щёток электродвигателя мощностью 2,5 Вт с разными материалами коллекторов при установке СЩ

№ п/п	Условия опыта	Марка щёток	Суммарный износ щёток (нормальные + высотные условия), мм·10 <sup>-3</sup>
1	Установлена смазывающая щётка, коллектор из <b>меди</b> .	Г-21А	15,2
2	Установлена смазывающая щётка, коллектор из <b>кадмиевой бронзы</b> .	Г-21А	10,6
3	Установлена смазывающая щётка, коллектор из <b>хромовой бронзы</b> .	Г-21А	6,4

В таблице 2.8 представлены параметры электродвигателей при установке СЩ при разных материалах коллектора. Во всех случаях отмечается некоторое увеличение тока и снижение частоты вращения. Изменения параметров при использовании кадмиевой и хромистой бронз приблизительно одинаково. Якорь с коллектором из меди в случае установки СЩ характеризуется в общем большей величиной потребляемого тока. Однако все электродвигатели соответствуют ТУ на их поставку.

Вместе с этим были проведены исследования по влиянию установки СЩ на износ токоведущих щёток в состав которых входит ДМ. Применение СЩ приводит к дальнейшему уменьшению износа токоведущих щёток.

Таким образом, установка СЩ приводит к снижению износа токоведущих щёток, наибольший эффект от применения СЩ наблюдался в случае коллекторов, изготовленных из хромовой бронзы.

Таблица 2.8 - Влияние установки СЩ на рабочие характеристики двигателей мощностью 2,5 Вт с разными материалами коллекторов

Условия опытов	Момент, М, кгс·см	Ток, I, А		Частота вращения, 1/мин	
		правое	левое	правое	левое
Г-21А, коллектор из меди	<b>100 циклов в нормальных условиях при U=27 В</b>				
	0,026	0,945	0,94	14080	13680
	<b>25 циклов при t=+85°C±3°C, P=15+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
	0,026	0,91	0,9	15195	15285
	<b>25 циклов при t=-60°C±3°C, P=90+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
0,026	1	1	16275	16680	
Г-21А + СЩ, коллектор из меди	<b>100 циклов в нормальных условиях при U=27 В</b>				
	0,026	0,97	0,96	14400	15000
	<b>25 циклов при t=+85°C±3°C, P=15+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
	0,026	0,85	0,87	19410	19500
	<b>25 циклов при t=-60°C±3°C, P=90+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
0,026	1,25	1,24	14565	15180	
Г-21А, коллектор из кадмиевой бронзы	<b>100 циклов в нормальных условиях при U=27 В</b>				
	0,026	0,85	0,85	15480	15450
	<b>25 циклов при t=+85°C±3°C, P=15+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
	0,026	0,87	0,87	15655	15590
	<b>25 циклов при t=-60°C±3°C, P=90+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
0,026	1	1	16105	16075	
Г-21А + СЩ, коллектор из кадмиевой бронзы	<b>100 циклов в нормальных условиях при U=27 В</b>				
	0,026	1	1	14340	14380
	<b>25 циклов при t=+85°C±3°C, P=15+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
	0,026	0,91	0,91	14620	14715
	<b>25 циклов при t=-60°C±3°C, P=90+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
0,026	1,02	1,02	16965	16995	
Г-21А, коллектор из хромовой бронзы	<b>100 циклов в нормальных условиях при U=27 В</b>				
	0,026	0,88	0,88	15980	16120
	<b>25 циклов при t=+85°C±3°C, P=15+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
	0,026	0,92	0,92	15785	15885
	<b>25 циклов при t=-60°C±3°C, P=90+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
0,026	1	1	17625	17675	
Г-21А + СЩ, коллектор из хромовой бронзы	<b>100 циклов в нормальных условиях при U=27 В</b>				
	0,026	0,95	0,95	14760	15030
	<b>25 циклов при t=+85°C±3°C, P=15+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
	0,026	0,93	0,93	15375	15585
	<b>25 циклов при t=-60°C±3°C, P=90+15% мм.рт.ст. при U=29,4 В</b>				
0,026	1,03	1,03	16770	17115	

## **2.4 Результаты промышленных испытаний в высотных условиях двигателей постоянного тока герметизированного исполнения в случае применения щёточно-коллекторного узла, оборудованного смазывающей щёткой**

В разделе приведены результаты испытания четырёх двигателей постоянного тока мощностью 2,5 Вт с коллекторами из меди, щётки МГС-7И и семи двигателей мощностью 5 Вт с коллекторами из хромовой бронзы, оборудованные щётками МГС-7И, Г-21А, Г-32 в сочетании со СЩ на устойчивость к циклическому изменению температуры, на прочность при воздействии механических ударов многократного действия, на воздействие повышенной и пониженной температуры +120°С, -60°С, на воздействие повышенной влажности, воздействие атмосферных конденсированных осадков (роса и внутреннее обледенение), на гарантийную наработку. В каждом случае в испытаниях использовался один двигатель со штатным щёточно-коллекторным узлом (выступавший в роли эталонного).

У двигателей мощностью 2,5 Вт с модернизированным щёточно-коллекторным узлом после испытаний на воздействие повышенной температуры с пониженным атмосферным давлением – 25 циклов; воздействием пониженной температуры – 25 циклов износ щёток уменьшился в три раза по отношению к эталонному. После испытаний на гарантийную наработку в нормальных условиях – 1667 циклов и 83334 импульсных включений износ щёток уменьшился (по отношению к эталонному двигателю) в 2,5 раза.

У двигателя мощностью 5 Вт после испытаний на воздействие повышенной температуры с пониженным атмосферным давлением и воздействием пониженной температуры износ щёток МГС-7И уменьшился по отношению к эталонному двигателю, оборудованному щётками МГС-7И в 3,5 раза. Износ щёток Г-21А и Г-32 снизился соответственно в 13 и 10 раз. После испытаний на гарантийную наработку в нормальных условиях 1200 циклов износ щёток МГС-7И, Г-21А, Г-32 снизился соответственно в 1,6; 3,5;

2,3 раза. После испытаний на гарантийную наработку в нормальных условиях с различными температурными режимами (нормальные условия 1100 циклов; 80°C – 300 циклов; 120°C – 250 циклов; -60°C – 550 циклов) износ снизился соответственно в 1,4; 4; 1,6 раза. Двигатели после испытаний соответствовали требованиям на их поставку.

Двигатели мощностью 10 Вт успешно прошли термо-вакуумные испытания ( $p = 10^{-5} \div 10^{-6}$  мм.рт.ст.;  $t = -50 \div -55^\circ\text{C}$  и  $t = 50 \div 55^\circ\text{C}$ ) при относительно малом износе щёток.

При всех видах испытаний параметры двигателей соответствовали требованиям на их поставку. Принято решение о внедрении двигателей мощностью 2,5 и 5 Вт, оборудованных СЩ в серийное производство.

## **2.5 Влияние хранения электрических машин на эффективность смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена**

Для проверки влияния сроков хранения было выбрано 4 поворотных электромеханизма с двигателями мощностью 5 Вт. Одна пара двигателей имела на коллекторах щётки Г-21А, вторая МГС-7И. Коллектора выполнены из хромовой бронзы. Была проведена проверка параметров электромеханизмов по программе приёмо-сдаточных испытаний.

Затем двигатели были оборудованы дополнительными СЩ, выполненными на основе ДМ и проведена проверка параметров по программе приёмо-сдаточных испытаний; замерен износ щёток при работе в нормальных условиях и климатике, замерено сопротивление ПП в одной точке коллекторной пластины путём установки измерительного датчика в окно штатного щёткодержателя (таблица 2.9).

После того, как одна пара механизмов прошла срок хранения 1 год, а вторая 1 год 9 месяцев были проведены замеры сопротивления ПП (в тех же точках) и сняты все ранее указанные характеристики и износы.

Сопротивление ПП, образованной щётками МГС-7И практически остаётся постоянным. Сопротивление ПП, образованное щётками Г-21А, под

влиянием срока хранения уменьшается у двигателя №62 на 20% (после года хранения), у двигателя №36 на 15% (после срока хранения 1 год 9 месяцев).

Параметры электромеханизмов (потребляемый ток и время поворота выходного вала), оборудованных щётками МГС-7И возрастают (в пределах нескольких процентов), в случае щёток Г-21А уменьшаются.

Износ штатных и СЩ до и после хранения остаётся приблизительно одинаков.

Длительное хранение двигателей (в течении 1 года и 1 года 9 месяцев), оборудованных дополнительной щёткой на основе ДМ, не оказывает существенного влияния на характеристики двигателей и износные свойства штатных щёток. Параметры двигателей соответствуют ТУ на поставку.

Таблица 2.9 - Сопротивление ПП при установке смазывающих щёток

(нормальные условия: 150 циклов; при  $t=+120\pm 3^{\circ}\text{C}$ ;  $P=15\pm 1\%$  мм.рт.ст.: 50 циклов; при  $t=-60\pm 3^{\circ}\text{C}$ : 50 циклов)

№ двигателя					
1					
Марка токоведущих щёток	МГС-7И + СЩ				
№ замера	1	2	3	4	5
Сопротивление ПП, R, Ом	1,05	1,05	1,06	1,06	1,05
2					
Марка токоведущих щёток	Г-21А + СЩ				
№ замера	1	2	3	4	5
Сопротивление ПП, R, Ом	1,46	1,45	1,47	1,45	1,48
3					
Марка токоведущих щёток	МГС-7И + СЩ				
№ замера	1	2	3	4	5
Сопротивление ПП, R, Ом	0,95	0,98	1,02	0,94	0,92
4					
Марка токоведущих щёток	Г-21А + СЩ				
№ замера	1	2	3	4	5
Сопротивление ПП, R, Ом	1,43	1,48	1,5	1,5	1,49



## Выводы по главе 2

1. При работе коллекторной электрической машины в высотных условиях повышенный износ щёток обусловлен снижением содержания влаги и кислорода в атмосфере, что приводит к повышению коэффициента трения и замедлению (при отсутствии дренажа) процесса образования ПП. Понижение степени герметизации приводит к уменьшению износов щёток за счёт образования на коллекторе ПП (в наших исследованиях изготовление дренажа уменьшило износ щёток в 2,7 раза).

2. Материал коллектора (медь, кадмиевая бронза, хромовая бронза) оказывает активное влияние на износ щёток. Наименьший износ щёток обеспечивают коллектора, выполненные из хромовой бронзы (износ щёток уменьшается в 1,7 раза относительно коллектора из меди).

3. Значительное снижение износа щёток в высотных условиях может быть достигнуто за счёт установки на коллектор дополнительной СЩ, выполненной из дисульфида молибдена (ДМС-140 в соответствии с ТУ4819133.90). Эффективность применения СЩ зависит от материала коллектора. В случае медного коллектора износ щёток снижается в 2,4 раза, при кадмиевой бронзе в 3,4 раза, при хромовой бронзе в 5,7 раз относительно износа на коллекторе, изготовленном из меди и без установки СЩ.

4. Двигатели мощностью 2,5 и 5 Вт с токоведущими щётками марок МГС-7И, Г-21А и коллекторами изготовленными из меди и хромовой бронзы, оборудованные СЩ, успешно прошли испытания с положительным результатом на устойчивость к циклическому изменению температур, на вибропрочность, на воздействие механических ударов многократного действия, на воздействие повышенной влажности, на устойчивость к воздействию атмосферных конденсированных осадков (росы и внутреннего обледенения), гарантийную наработку и рекомендованы к внедрению в серийное производство.

5. Длительное хранение двигателей с коллектором, выполненном из меди и щётками МГС-7, оборудованных СЩ (в течении одного года и 1 года 9 месяцев) не оказывает существенного влияния на характеристики двигателей. Все двигатели после испытаний соответствовали ТУ на их поставку при относительно низком износе щёток.

6. Двигатели мощностью 10 Вт успешно прошли термо-вакуумные испытания при давлении  $p = 10^{-5} \div 10^{-6}$  мм.рт.ст. и температурах  $t = -50 \div -55^{\circ}\text{C}$  и  $t = 50 \div 55^{\circ}\text{C}$ ).

### ГЛАВА 3. МЕТОДИКА УСКОРЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПОЛИТУРНОЙ ПЛЁНКИ НА КОЛЛЕКТОРАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 3.1 Особенности работы стартёр-генератора ГС-12ТОК

Стартёр-генератор ГС-12ТОК на самолётах используется для запуска вспомогательной силовой установки ТА-12 и питания бортовой сети самолёта постоянным током. В стартёре используются 18 щёток марки МГС-7, коллектор выполнен из хромовой бронзы (БрХ1 ТУ7821154-77). При переходе на питание бортовой сети самолёта АН-124-100 переменным током, он стал использоваться только в стартёрном режиме (для запуска вспомогательной силовой установки). Поскольку вспомогательная силовая установка жёстко соединена с валом стартёр-генератора, то при работе вспомогательной силовой установки в течении 2-4 часов (в соответствии с условиями эксплуатации) якорь стартёр-генератора вращается при отсутствии тока в щёточно-коллекторном узле. Изменение режима работы стартёр-генератора привело к катастрофическому увеличению износа щёток. Для обеспечения необходимого ресурса щёточно-коллекторного узла при поставке генераторов для объектов завод-изготовитель стал прилагать 5 комплектов щёток. Соответственно в 5 раз был уменьшен срок между регламентными работами. Замена щёток предполагает снятие генератора с объекта, притирку нового комплекта щёток в течении 7-8 часов и установку на объект. Работы проводятся только на лицензированных авиационных ремонтных заводах (г. Ульяновск, г. Мин. воды).

Проведённые нами исследования позволили сделать предположение о причине повышенных износов. При работе в стартерном режиме при пуске и дальнейшем сбросе нагрузки по переходным процессам возникает искрение, обусловленное замедленным ( $A_{HK}$ ) и ускоренным ( $A_{ПК}$ ) характером коммутации (рисунок 3.1) за счёт отставания изменения индукции  $B_K$  в дополнительных полюсах от тока якоря  $I$  из-за вихревых токов, возникающих в магнитной системе дополнительных полюсов [25]. Индукция под дополнительным

полюсом измерялась с помощью датчика Холла, а искрение индикатором искрения ( $I$  – ток в коммутируемой секции,  $B_k$  – индукция в коммутационной зоне).

Ранее в случае генераторного режима ПП, нарушенная искрением в переходных процессах успевала восстанавливаться. Когда имел место режим только холостого хода, происходит дальнейшее нарушение (истирание) ПП, которая в конечном итоге исчезает (ПП является твёрдой смазкой, снижает износ щёток и защищает коллектор от износов).

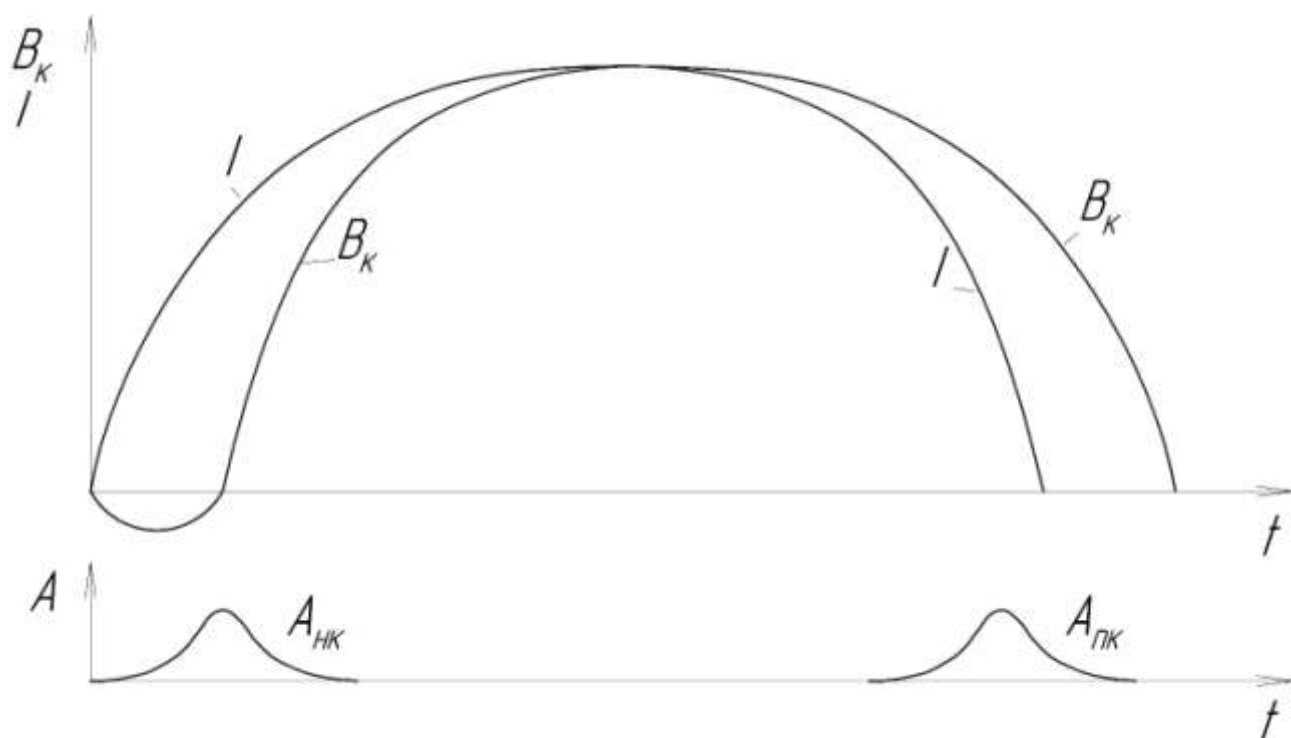


Рис. 3.1. Кривые тока нагрузки  $I$ , индукции в коммутационной зоне  $B_k$  и искрения при набросе ( $A_{нк}$ ) и сбросе ( $A_{пк}$ ) нагрузки

В таблице 3.1 представлены результаты заводских исследований влияния искрения на сопротивление ПП генератора ГС-12ТОК. Работы проводились в соответствии с приёмо-сдаточными испытаниями генератора в стартерном режиме. Повышенное искрение обеспечивалось ослаблением дополнительных полюсов за счёт их шунтирования сопротивлением. Испытания проводились в следующей последовательности. Снималась ПП и замерялось её начальное сопротивление  $R_{нач}$ . Для замера сопротивления ПП в два щёткодержателя, расположенных на одном болте, ставились две фальшщётки, изготовленные из

текстолита, в который были вмонтированы два посеребрённых медных стержня (рисунок 3.2). Электронным омметром определялось двойное сопротивление перехода датчик – ПП. Сопротивление замерялось на каждой коллекторной пластине коллектора и через среднее арифметическое рассчитывалось усреднённое сопротивление ПП на двух дорожках (измерительные щётки подпружинивались штатными пружинами). Значение сопротивления равное 0,002 Ом соответствует отсутствию ПП. Затем наводилась ПП при работе генератора в двигательном режиме при  $U=15$  В, время прикатки 7 час. и замерялось конечное сопротивление ПП  $R_{кон}$ . Генератор включался на работу в стартёрном режиме в течении 3 час с замером сопротивления ПП  $R_{кон}$ . Затем шёл двигательный режим в течении 5 час с замером сопротивления ПП и два часовых стартёрных режима с замером сопротивления ПП.

Как следует из приведённых данных, наблюдается активное влияние искрения на сопротивление ПП, что подтверждает высказанное выше предположение о причине повышенного износа щёток при снятии генераторного режима.

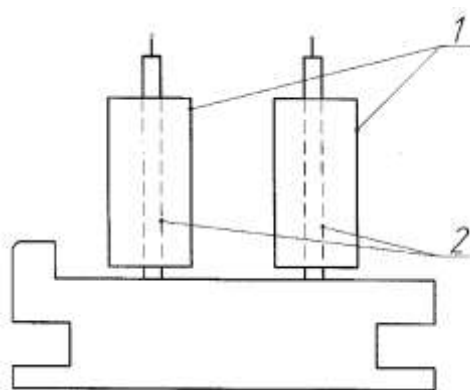


Рис. 3.2. Способ определения сопротивления политурной плёнки  
1-фальщётки; 2-электроды

Таблица 3.1 - Влияние искрения на сопротивление политурной пленки

Условие опытов	Сопротивление политурной плёнки:	
	начальное $R_{нач}$ , Ом	конечное $R_{кон}$ , Ом
Марка токоведущих щёток: МГС-7 (18 шт.)		
Двигательный режим: $U=15$ В, $t= 7$ час.	0,002	0,37
Стартерный режим $t= 3$ час.	0,37	0,0311
Двигательный режим: $U=15$ В, $t= 5$ час.	0,0311	0,345
Стартерный режим $t= 1$ час.	0,345	0,245
Стартерный режим $t= 1$ час.	0,245	0,135

### 3.2 Применение политуруобразующих щёток для снижения износа токоведущих щёток стартер-генератора ГС-12ТОК

В соответствии с результатами, полученными в п. 3.1, нами были проведены работы по оценке политуруобразующих свойств (сопротивления ПП и скорости её образования) различных марок щёток. Под скоростью образования ПП подразумевается приращение сопротивления ПП за время испытаний. Исследовался ряд отечественных марок щёток (ЭГ-74, ЭГ-54П, ЭГ-75, ЭГ-4, ЭГ-61А и ЭГ-61) на предмет оценки скорости образования ПП и величины её сопротивления на коллекторе с оценкой износа щёток. Нами делается допущение, что величина сопротивления ПП характеризует её толщину.

Во всех работах с коллектора снималась ранее наработанная ПП за счёт шлифовки коллектора и замерялось начальное сопротивление  $R_{нач}$  для контроля отсутствия ПП [4]. Затем, генератор оборудовался одной из марок щёток и проводился испытательный режим с замером сопротивления ПП  $R_{кон}$ , а также износов щёток. В таблице 3.2 представлены результаты испытаний при работе генератора на холостом ходу в обесточенном состоянии в течении 5 час, когда сопротивление ПП замерялось через час работы. Из анализа приведённых данных следует, что все исследуемые щётки имеют различную скорость

образования ПП, а также её конечную величину. В результате проведённой работы были выделены 4 марки щёток: ЭГ-4, ЭГ-61А и ЭГ-74 и ЭГ-61.

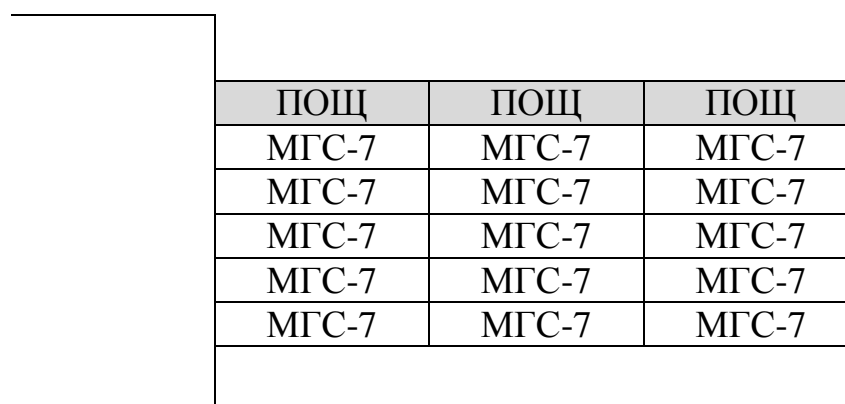
В таблице 3.3 представлены результаты работы генератора под нагрузкой. Практически все щётки, которые были испытаны, позволяют получить конечное сопротивление ПП больше, чем сопротивление со щёткой МГС-7. Дальнейшие испытания проводились для оценки возможности ускорения образования ПП, наведённой штатными щётками, за счёт установки на коллектор наряду со штатной одной щётки, обладающей высокой скоростью образования ПП с включением в систему токопередачи (рис. 3.3). В таблице 3.4 представлены результаты испытаний на холостом ходу в течении 5 часов с замером сопротивления ПП через час работы. В большинстве случаев наблюдается ускорение процесса образования ПП на коллекторе по отношению к опытам, когда на коллектор устанавливались только штатные щётки. Наибольшее сопротивление обеспечивают щётки ЭГ-61А (пропитанные и не пропитанные).

Таблица 3.2 - Образование политурной плёнки на холостом ходу  
( $n=6000$  об/мин,  $t=5$  час)

№ п/п	Марка токоведущих щёток	Сопротивление политурной плёнки, Ом					
		Начальное сопротивление политурной плёнки, $R_{нач}$ , Ом	Время проведения замера сопротивления политурной плёнки, час				
			1	2	3	4	5
1	ЭГ-54П (18 шт)	0,002	0,393	0,207	0,516	1,152	0,93
2	ЭГ-75 (18 шт)	0,002	0,103	0,212	0,246	0,78	0,95
3	МГС-7 (18 шт.)	0,002	0,53	0,46	0,604	1,08	1,034
4	ЭГ-74 (18 шт)	0,002	2,035	2,448	2,646	2,383	2,145
5	ЭГ-61 (18 шт)	0,002	1,076	0,902	1,487	1,776	2,219
6	ЭГ-61А (18 шт)	0,002	0,6	1,17	1,27	1,79	2,535
7	ЭГ-4 (18 шт)	0,002	0,43	0,77	1,596	1,877	2,9

Таблица 3.3 - Образование политурной плёнки под нагрузкой ( $I=300$  А,  $n=6000$  об/мин,  $t=30$  час)

№ п/п	Марка токоведущих щёток	Начальное сопротивление политурной плёнки $R_{нач}$ , Ом	Конечное сопротивление политурной плёнки $R_{кон}$ , Ом
1	МГС-7 (18 шт.)	0,002	0,528
2	ЭГ-61 (18 шт)	0,002	0,912
3	ЭГ-4 (18 шт)	0,002	1,7
4	ЭГ-54П (18 шт)	0,002	1,84
5	ЭГ-61А (18 шт)	0,002	2,01
6	ЭГ-75 (18 шт)	0,002	2,08
7	ЭГ-74 (18 шт)	0,002	2,113
8	ЭГ-4 (18 шт)	0,002	3,41



ПОЩ – политурообразующая щётка  
 МГС-7 – марка серийной токоведущей щётки

Рис. 3.3. Схема расположения щёток на коллекторе



Таблица 3.4 - Образование политурной плёнки на холостом ходу с политурообразующими щётками

№	Марка токоведущих щёток	Сопротивление политурной плёнки, Ом					
		Начальное сопротивление политурной плёнки, $R_{нач}$ , Ом	Сопротивление политурной плёнки через час работы, Ом				
			1	2	3	4	5
1	МГС-7 (18 шт.)	0,002	0,360	0,537	0,526	0,461	0,731
2	МГС-7 (15 шт), ЭГ-75 (3 шт)	0,002	0,432	0,515	0,261	0,324	0,262
3	МГС-7 (15 шт), ЭГ-61 (3 шт)	0,002	0,34	0,404	0,51	0,71	0,93
4	МГС-7 (15 шт), ЭГ-4 (3шт)	0,002	0,12	0,28	0,61	0,86	0,877
5	МГС-7 (15 шт), ЭГ-61А (3 шт)	0,002	0,6	0,75	0,897	0,89	1,71
6	МГС-7 (15 шт), графит (3 шт)	0,002	0,44	0,51	0,86	0,78	1,32
7	МГС-7 (15 шт), ЭГ-74 (3 шт)	0,002	0,400	0,513	1,088	0,845	1,365
8	МГС-7 (15 шт), ЭГ-61А (не пропитанные) (3 шт)	0,002	0,56	0,807	2,35	2,2	1,81

В таблице 3.5 и рис. 3.4 представлены результаты исследований влияния пусковых режимов на сопротивление ПП в случае использования ПОЩ ЭГ-61А (на 5 токоведущих щёток одной дорожки установлена одна ПОЩ (рис. 3.3)). Из анализа таблиц 3.1 и 3.5 видно, что применение ПОЩ позволяет повысить устойчивость ПП к искрению, возникающему в стартовых режимах.

Таблица 3.5 - Влияние искрения на сопротивление политурной пленки в случае применения политурообразующих щёток ЭГ-61А

Условие опытов	Сопротивление политурной плёнки:	
	начальное $R_{нач}$ , Ом	конечное $R_{кон}$ , Ом
Двигательный режим: $U=15$ В, $t=7$ часов.	0,002	0,4
Стартерный режим $t=3$ часа.	0,4	0,497
Двигательный режим: $U=15$ В, $t=5$ часов.	0,497	0,501
Стартерный режим $t=1$ час.	0,501	0,334
Стартерный режим $t=1$ час.	0,334	0,327
Двигательный режим: $U=15$ В, $t=5$ часов.	0,327	0,8
Стартерный режим $t=1$ час.	0,8	0,529
Стартерный режим $t=1$ час.	0,529	0,456

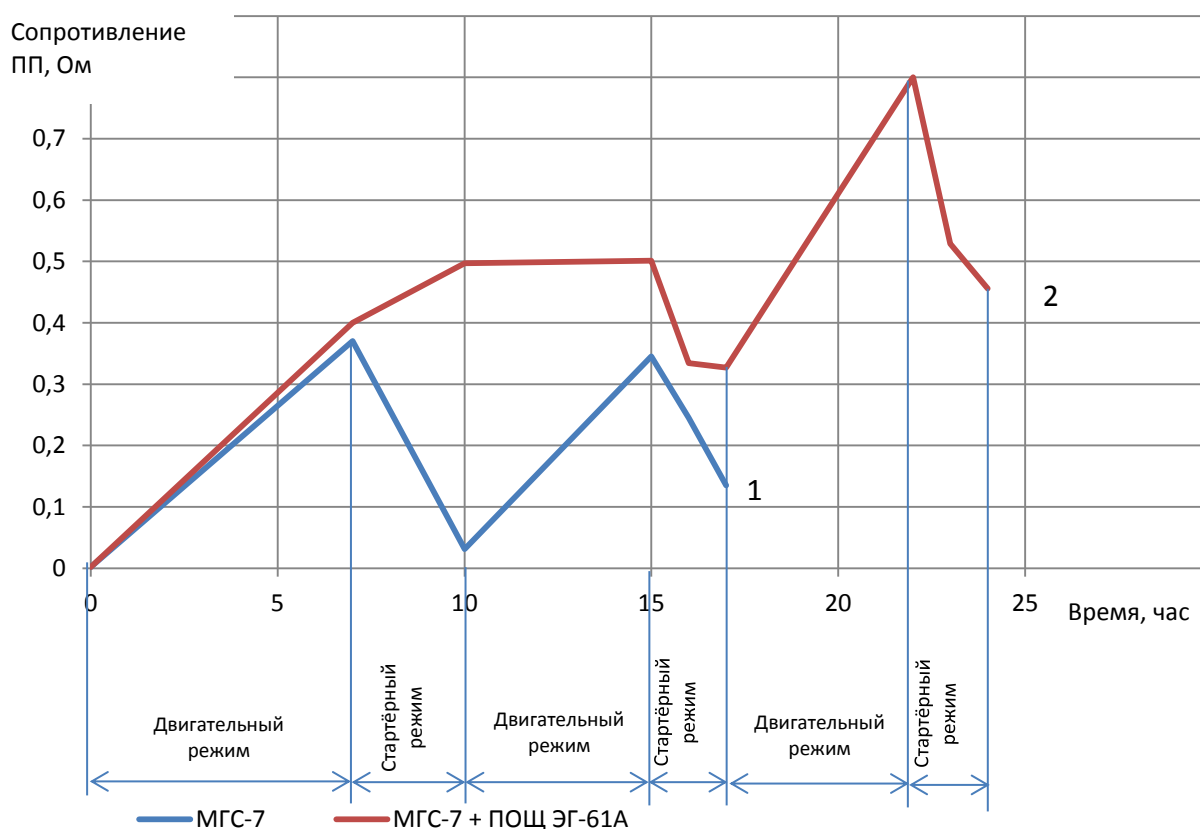


Рис. 3.4. Зависимость сопротивления ПП от искрения стартерного режима  
 1 – На коллекторе установлен полный комплект щёток МГС-7.  
 2 – Вместо одной щётки МГС-7 на каждую дорожку установлена одна ПОЩ

Для оценки эффективности ПОЩ, два генератора были оборудованы ПОЩ ЭГ-61А и ЭГ-74. У этих щёток допустимые линейные скорости соответствуют линейным скоростям генератора, а сопротивление тела щёток несколько больше, чем сопротивление тела щёток МГС-7, что предотвращает их

перегрузку током. Допустимое удельное давление щётки ЭГ-61А позволило оставить штатное давление (800г), давление на щётку ЭГ-74 было уменьшено до 400 г. Вначале были проведены исследования генераторов в штатном состоянии по программе приёмо-сдаточных испытаний (ПСИ), которые показали их соответствие требованиям ТУ на поставку. Перед испытаниями были проточены коллекторы, проведена их продорожка и прикатан новый комплект щёток МГС-7. Затем ПП снималась стеклянной шкуркой и генераторы ставились на испытательный цикл. Испытательный цикл включал в себя 3 пуска (по режиму, соответствующему ТУ) и 10 часов работы в обесточенном состоянии, таких циклов 6. В конце каждого цикла измерялось сопротивление ПП, а в конце 60-то часового цикла износ щёток. Затем на этих генераторах аналогичные испытания были проведены при установке на все дорожки ПОЩ.

Как следует из рис. 3.5, применение ПОЩ ЭГ-74 и ЭГ-61А позволяет получить более быстрое восстановление сопротивления ПП по отношению к случаю, когда на генераторах стоят только штатные щётки МГС-7. Щётка ЭГ-74 даёт более быстрое восстановление ПП.

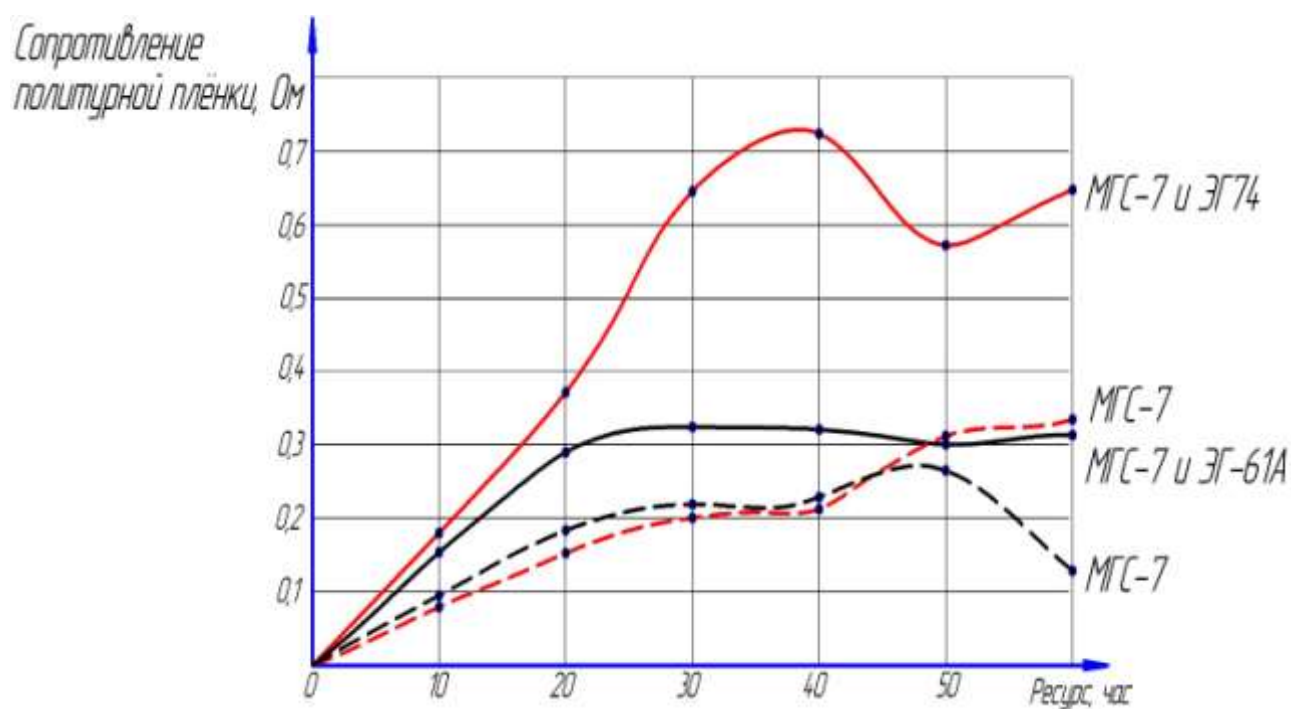


Рис. 3.5. Наведение политурной пленки щетками за 60 часов

В соответствии с проведёнными исследованиями у двух генераторов ГС-12ТОК шесть штатных щёток МГС-7 были заменены на ПОЩ ЭГ-61А. Давление на ПОЩ соответствовало удельному давлению на штатные щётки (800 г).

Генератор №1 был направлен в ЗАО «Полёт» г. Ульяновск для лётных испытаний на объекте АН-124-100, а генератор №2 в ОАО Научно-производственное предприятие «Аэросила» г. Ступино для моторных испытаний.

На генераторе №1 через 107 моточасов комплект щёток был заменён на новый (в соответствии с программой работы), второй комплект отработал 95 моточасов. В таблицах 3.6, 3.7 представлены износы щёток после испытаний (предельно допустимая высота щёток 17 мм). Генератор обеспечил удовлетворительную работу на объекте АН-124-100 в течении 202 моточасов (1585 лётных часов) (с двумя комплектами щёток) без замечаний ЗАО «Полёт». Высота щёток после испытаний второго комплекта щёток позволяет обеспечить второй ресурс работы (до предельно допустимой высоты щёток) 190 часов. В соответствии с письмом ЗАО «Полёт» г. Ульяновск наработка штатного комплекта щёток для генератора ГС-12ТОК составляет 102 моточаса.

Таблица 3.6 - Износ щёток после лётных испытаний за 107 моточасов работы

Высота первого комплекта щёток при выпуске, мм			Износ первого комплекта щёток за 107 моточасов работы, мм		
1 дорожка	2 дорожка	3 дорожка	1 дорожка	2 дорожка	3 дорожка
28,2	25,7	26,2	2,4	1,0	3,5
25,4	27,8	26,1	1,0	2,9	3,1
26,3	25,9	28,2	2,1	5,3	4,4
28,0	25,2	26,5	3,6	2,2	3,7
26,4	27,5	26,6	2,0	2,0	6,9
25,8	25,9	27,9	0,8	3,0	5,2
- ПОЩ ЭГ-61А					

Таблица 3.7 - Износ щёток после лётных испытаний за 95 моточасов работы

Высота второго комплекта щёток при выпуске, мм			Износ второго комплекта щёток за 95 моточасов работы, мм		
1 дорожка	2 дорожка	3 дорожка	1 дорожка	2 дорожка	3 дорожка
25,7	24,7	24,5	1,3	2,3	2,45
24,0	25,2	24,5	3	1,8	2,49
25,7	24,2	27,2	1,26	2,9	0,8
26,9	24,7	22,5	0,1	2,3	4,5
25,7	26	25,4	1,3	1	1,6
25,0	22,4	26,8	2	4,6	0,2

 - ПОЩ ЭГ-61А

Генератор №2 с ПОЩ ЭГ-61А успешно прошёл эквивалентно-циклические ресурсные стендовые испытания на вспомогательном газотурбинном двигателе ТА12(А) с относительно низким износом щёток. Генератор работал с приводом, имеющим обгонную муфту, отключающей его после окончания стартерного режима (т.е. генератор работал только в импульсном режиме без режима холостого хода). Износ ПОЩ ниже, чем у щёток МГС-7 (табл. 3.8). У генератора наблюдается общее увеличение сопротивления ПП. Суммарное сопротивление ПП первой и второй дорожек, которое наводится четырьмя ПОЩ составило 0,207 Ом; второй и третьей дорожек, которое наводится пятью ПОЩ составило 0,354 Ом, что подтверждает эффективность применения ПОЩ с позиции ускорения процесса образования ПП (большему числу ПОЩ соответствует большее сопротивление ПП). Сопротивление ПП до моторных испытаний было 0,1 Ом).

По окончании проведённых работ получен акт по результатам лётных и моторных испытаний (Приложение II).

Таблица 3.8 - Износ щёток после ресурсных стендовых испытаний генератора ГС-12ТОК

№ дорожки	1	2	3
Износ щёток, мм	0,2	2	1,4
	1,5	0,4	2,2
	1,5	2,1	0,4
	1,5	0,1	1
	2,4	0,1	1
	1,7	1,6	0,1
	- ПОЩ ЭГ-61А		

В дальнейшем для ускорения образования ПП на генераторе ГС-12ТОК вместо 6 штатных щёток были поставлены щётки ЭГ-74 (не пропитанные) с давлением 550-600г и генератор был направлен в ЗАО «Полёт» г. Ульяновск для лётных испытаний (на щётках МГС-7 штатное давление).

Показатель наработки двух комплектов щёток составил 389 моточасов до высоты второго комплекта щёток, указанной в таблице 3.9

Таблица 3.9 - Высота второго комплекта щёток генератора ГС-12ТОК после лётных испытаний

№ дорожки	1	2	3
Высота щёток, мм	23,5	24,6	22,4
	23	21,2	25,8
	24,6	21,3	24
	21,6	24,1	23,2
	23,5	22,4	24,2
	25,4	21	24,2
	- ПОЩ ЭГ-74		

Сопротивление ПП в среднем по коллектору равно 0,01 Ом. Поверхность коллектора и щёток не имеет подгаров. Поверхность щёток гладкая и

зеркальная. Наблюдается износ коллектора 1,08 – 1 – 0,7 мм (по дорожкам на диаметр), биение 0,02 – 0,01 – 0,06 мм (при выпуске 0,015 мм).

Таким образом, использование ПОЩ позволило увеличить ресурс щёток генератора ГС-12ТОК приблизительно в 2 раза. После проведения работ получен акт по результатам лётных испытаний (Приложение III).

После испытаний оба генератора прошли восстановительный ремонт и были оборудованы ПОЩ ЭГ-61А (не пропитанными) (генератор №1) и ЭГ-74 (не пропитанными) (генератор №2). Давление на штатные и ПОЩ 500-550 г. Среднее значение сопротивления ПП после ПСИ в случае щёток ЭГ-74 0,21 Ом (таблица 3.10). При щётках ЭГ-61А (не пропитанных) – 0,14 Ом (таблица 3.11). После лётных испытаний сопротивление ПП в случае применения щёток ЭГ-74 составило 0,013 Ом (таблица 3.12). Поверхность щёток и коллектора имеет ребристый вид, на набегающем крае одной ПОЩ имеется скол глубиной 1,5 мм, шириной 2 мм. Высота щёток после испытаний приведена в таблице 3.13. Ресурс составил 130 моточасов.

На генераторе, оборудованном щётками ЭГ-61А (не пропитанные), сопротивление ПП после лётных испытаний (2 ресурса) - 0,14 Ом (таблица 3.14). Визуально на коллекторе наблюдалась установившаяся ПП, поверхность щёток ровная, без рисков (у генератора, оборудованного щётками ЭГ-61А было проведено два ресурсных испытания на одном комплекте щёток). После первого ресурса (173 моточаса) при осмотре замечаний не было и генератор был поставлен на второй ресурс. После второго ресурса (170 моточасов) при осмотре на щётках среднего ряда были обнаружены незначительные сколы на набегающем крае шириной 0,5 мм, глубиной 1 мм. В связи с этим генератор на третий ресурс не был поставлен. Нарботка генератора составила 343 час. / 973 запуска. Значение высоты щёток после ресурсных испытаний приведена в таблице 3.15. После проведения лётных испытаний у генератора была снята поламальная характеристика по трём дорожкам (замерен перепад ламелей) (таблица 3.16), проверено биение по рабочей части коллектора (1 дорожка – 26 мкм; 2 дорожка – 76 мкм; 3 дорожка

– 49 мкм) (допустимое значение биения 20 мкм) (таблица 3.17). Как следует из приведённых данных (таблица 3.16), по второй дорожке имеются пластины с перепадом значительно выше допустимого значения. Максимальный перепад ламелей из табл. 3.16 56 мкм при допустимом перепаде 40 мкм. Биение коллектора на второй дорожке также выше допустимого значения (76 мкм при допустимом значении 20 мкм). Определён износ коллектора (таблица 3.18). Следовательно, можно предположить, что сколы щёток и их повышенный износ по второй дорожке вызван неисправностью коллектора, возникшей по мере наработки.

Таким образом, в результате проведённых исследований наработка щёток генератора ГС-12ТОК за счёт применения ПОЩ ЭГ-61А (не пропитанных) в сочетании с уменьшенным давлением, была увеличена по щёткам средней дорожки более чем в два раза. Расчётный показатель наработки до предельно допустимого размера щёток 1 и 3 дорожек составляет 400 час, что соответствует увеличению ресурса более чем в 5 раз. После окончания работ по оценке влияния установки ПОЩ на сопротивление ПП был получен акт по результатам лётных испытаний (Приложение IV). В настоящее время АО «Лепсе» совместно с кафедрой ЭМА ВятГУ проводится хоздоговорная работа по проведению заключительных лётных испытаний для решения вопроса о внедрении в серийное производство, когда два генератора будут оборудованы щётками ЭГ-61А со штатным давлением на все щётки и два генератора, оборудованные щётками ЭГ-61А (не пропитанными) с давлением на все щётки 500-550 г.

Таблица 3.10 - Сопротивление политурной плёнки (щётки ЭГ-74 не пропитанные, давление на щётки:  $P_{ЭГ-74}=500-550$  г,  $P_{МГС-7}=500-550$  г) до лётных испытаний

	Сопротивление политурной плёнки, Ом									
1-2 дорожка	0.366	0.416	0.266	0.316	0.246	0.116	0.156	0.096	0.246	0.366
2-3 дорожка	0.156	0.146	0.136	0.146	0.286	0.216	0.266	0.156	0.186	0.156



$R_{cp}=0,21$  Ом (по всем дорожкам)

Таблица 3.11 - Сопротивление политурной плёнки (щётки ЭГ-61А не пропитанные, давление на щётки:  $P_{ЭГ-61А}=500-550$  г,  $P_{МГС-7}=500-550$  г) до лётных испытаний

	Сопротивление политурной плёнки, Ом															
1-2 дорожка	0.135	0.125	0.135	0.105	0.135	0.145	0.075	0.105	0.115	0.215	0.195	0.165	0.185	0.115	0.125	0.065
2-3 дорожка	0.105	0.105	0.105	0.205	0.105	0.165	0.215	0.085	0.165	0.055	0.075	0.085	0.265	0.225	0.175	0.055

$R_{cp}=0,14$  Ом (по всем дорожкам)

Таблица 3.12 - Сопротивление политурной плёнки (щётки ЭГ-74 не пропитанные  $P_{ЭГ-74}=500-550$  г,  $P_{МГС-7}=500-550$  г) после лётных испытаний

	Сопротивление политурной плёнки, Ом										
1-2 дорожка	0.029	0.032	0.008	0.01	0.008	0.008	0.006	0.006	0.011	0.009	
2-3 дорожка	0.012	0.034	0.04	0.022	0.014	0.01	0.012	0.02	0.01	0.005	

$R_{cp}=0,013$  Ом (по всем дорожкам)

Таблица 3.13 - Высота щёток после лётных испытаний (щётки ЭГ-74 не пропитанные, давление на щётки:  $P_{ЭГ-74}=500-550$  г,  $P_{МГС-7}=500-550$  г)

№ щётчного пальца	Высота щёток, мм		
	1 дорожка	2 дорожка	3 дорожка
1	20.9	20.9	23.5
2	22.4	20.5	23.1
3	20.8	21.4	22.3
4	20.9	21	22.2
5	22.1	21.2	23.3
6	22	21.9	23.5

 - ПОЩ

Таблица 3.14 - Сопротивление политурной плёнки (щётки ЭГ-61А не пропитанные  $P_{ЭГ-61А}=500-550$  г,  $P_{МГС-7}=500-550$  г) после лётных испытаний

	Сопротивление политурной плёнки, Ом																
1-2 дорожка	0.443	0.043	0.563	0.203	0.023	1.003	0.583	0.093	0.393	0.053	0.613	0.163	0.053	0.063	0.053	0.053	0.113
2-3 дорожка	0.033	0.033	0.043	0.103	0.323	0.083	0.053	0.103	0.123	0.063	0.143	0.083	0.053	0.043	0.023	0.013	0.263

$R_{ср}=0,14$  Ом (по всем дорожкам)

Таблица 3.15 - Высота щёток после лётных испытаний (щётки ЭГ-61А не пропитанные, давление на щётки:  $P_{ЭГ-61А}=500-550$  г,  $P_{МГС-7}=500-550$  г)

№ щёточного пальца	Высота щёток, мм		
	1 дорожка	2 дорожка	3 дорожка
1	20.3	20.2	24.5
2	23.6	20.5	20.5
3	20.6	22	21.3
4	20.1	21	23.6
5	24.3	18.9	20.7
6	20.5	23.9	21


 - ПОЩ

Таблица 3.16 - Поламельная характеристика

	Величина перепада пластин, мкм									
Номер пластины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3 дорожка (от втулки)	0	2	4	5	6	7	8	10	11	12
2 дорожка (от втулки)	0	6	12	21	28	34	30	18	19	2
1 дорожка (от втулки)	0	-2	-2	-2	-3	0	-3	0	0	1
по нерабочей части	0	4	5	2	3	3	5	5	6	5
	Величина перепада пластин, мкм									
Номер пластины	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3 дорожка (от втулки)	14	16	18	21	23	26	28	29	31	33
2 дорожка (от втулки)	0	0	6	14	23	31	36	39	36	28
1 дорожка (от втулки)	0	2	3	5	7	7	8	9	9	8
по нерабочей части	3	5	7	6	6	3	3	5	3	6
	Величина перепада пластин, мкм									
Номер пластины	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
3 дорожка (от втулки)	36	37	36	31	25	24	18	18	17	15
2 дорожка (от втулки)	23	16	13	11	10	10	11	13	17	22
1 дорожка (от втулки)	6	5	3	2	1	2	4	5	6	7
по нерабочей части	2	4	5	6	3	1	5	4	7	5
	Величина перепада пластин, мкм									
Номер пластины	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
3 дорожка (от втулки)	15	15	16	16	16	18	19	18	20	20
2 дорожка (от втулки)	26	30	31	25	14	5	-7	-12	-12	-13
1 дорожка (от втулки)	8	10	10	10	11	10	11	8	7	5
по нерабочей части	4	7	7	4	8	6	6	9	11	6
	Величина перепада пластин, мкм									
Номер пластины	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
3 дорожка (от втулки)	20	19	20	21	19	23	19	16	14	9
2 дорожка (от втулки)	-9	0	11	25	32	41	47	48	43	34
1 дорожка (от втулки)	5	4	1	0	-1	-2	-2	-1	0	0
по нерабочей части	7	5	8	11	6	6	6	8	6	6
	Величина перепада пластин, мкм									
Номер пластины	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
3 дорожка (от втулки)	28	22	16	11	13	15	19	22	27	32
2 дорожка (от втулки)	1	1	1	0	0	-1	0	0	-1	1
1 дорожка (от втулки)	7	8	7	6	6	9	5	6	7	9
по нерабочей части	6	5	4	4	4	6	5	9	7	10
	Величина перепада пластин, мкм									
Номер пластины	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
3 дорожка (от втулки)	12	15	17	22	24	26	27	29	33	36
2 дорожка (от втулки)	38	45	50	54	55	45	32	18	7	-2
1 дорожка (от втулки)	0	-2	-3	-1	-3	-2	-4	-6	-10	-14
по нерабочей части	8	9	8	8	10	9	7	9	7	6

Окончание таблицы 3.16

Величина перепада пластин, мкм												
Номер пластины	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80		
3 дорожка (от втулки)	39	41	38	35	32	27	25	21	19	17		
2 дорожка (от втулки)	-5	-6	-2	5	14	27	39	50	56	62		
1 дорожка (от втулки)	-13	-15	-15	-14	-13	-13	-12	-12	-12	-10		
по нерабочей части	7	6	5	10	5	9	9	5	11	11		
Величина перепада пластин, мкм												
Номер пластины	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90		
3 дорожка (от втулки)	14	14	11	12	12	13	13	14	13	8		
2 дорожка (от втулки)	63	59	48	40	30	26	24	23	22	23		
1 дорожка (от втулки)	-9	-9	-8	-7	-6	-6	-5	-5	-4	-3		
по нерабочей части	2	3	7	5	4	6	7	9	9	10		
Величина перепада пластин, мкм												
Номер пластины	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
3 дорожка (от втулки)	8	5	0	-3	-4	-5	-8	-6	-5	-4	-3	-1
2 дорожка (от втулки)	28	33	34	40	43	40	28	13	4	-2	-6	-2
1 дорожка (от втулки)	-2	-2	-1	0	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
по нерабочей части	6	9	9	7	10	5	9	4	10	3	6	2

Таблица 3.17 - Биение коллектора

	Биение коллектора, мкм		
	Со стороны щита	Средняя дорожка	Со стороны корпуса
До лётных испытаний	10	20	60
После лётных испытаний	49	76	26

Таблица 3.18 - Износ коллектора

Износ коллектора, мм		
Со стороны щита	Средняя дорожка	Со стороны корпуса
0.79	0.43	0.73

### **Выводы по главе 3**

1. В генераторе ГС-12ТОК при работе на самолёте АН-124-100 Руслан наблюдается повышенный износ щёток, обусловленный режимом работы на объекте. Генератор используется для запуска высоковольтной силовой установки и в дальнейшем работает с силовой установкой в режиме холостого хода (при отсутствии тока якоря) в течении нескольких часов. Пусковые режимы нарушают политурную плёнку вплоть до её полного разрушения вызывая повышенный износ щёток. В соответствии с этим задача наших исследований состояла в выработке мероприятий по ускорению процесса образования ПП на коллекторе.

2. Из анализа результатов исследований по оценке политурообразующих свойств разных марок электрических щёток (МГС-7, ЭГ-61, ЭГ-4, ЭГ-54П, ЭГ-74, ЭГ-61А) при работе исследуемого генератора в режиме холостого хода, наибольшей скоростью образования ПП обладают щётки ЭГ-74 и ЭГ-61А. Под скоростью образования ПП подразумевается приращение сопротивления ПП за время испытаний. При работе под нагрузкой наибольшую скорость образования ПП обеспечивают щётки ЭГ-74.

3. Для ускорения образования ПП предложена методика, по которой в многощёточных системах наряду со штатными щётками в систему токопередачи включаются щётки, обладающие повышенной скоростью образования ПП. Использование в виде политурообразующих щёток с базовыми щётками МГС-7 щёток марки ЭГ-61 (не пропитанных) позволило увеличить скорость образования ПП при работе на холостом ходу в 2,4 раза.

4. Заводские испытания, проведённые на двух генераторах, оборудованных щётками ЭГ-61А и ЭГ-74 (работающих по испытательному циклу: 3 пуска и 10 часов работы в обесточенном состоянии, таких циклов 6) подтвердило эффективность политурообразующих щёток. Генераторы, оборудованные политурообразующими щётками, прошли приёмо-сдаточные испытания и соответствовали требованиям ТУ на их поставку.

5. Генератор оборудованный политурообразующими щётками ЭГ-61А при штатном давлении на все щётки обеспечил увеличение ресурса токоведущих щёток более чем в 2 раза. Генератор с политурообразующими щётками ЭГ-74 при штатном давлении на токоведущие щётки и пониженном давлении на политурообразующие также обеспечил увеличение ресурса более чем в два раза. В обоих случаях ПП после испытаний на коллекторе практически отсутствовала.

6. Генератор, оборудованный ПОЩ ЭГ-61А (не пропитанными) при давлении на все щётки 550 г дал увеличение ресурса щёток до 5 раз при стабильной ПП после лётных испытаний и рекомендуется к внедрению в серийное производство.

7. Для принятия окончательного решения о внедрении в серийное производство проводятся дополнительные испытания опытных генераторов в заводских условиях. Генератор, оборудованный щётками ЭГ-61А (6 штук) и МГС-7 (12 штук) с давлением на щётки 500-550 г, успешно прошёл испытания на ударную прочность.

8. Исследованы политурообразующие свойства щёток марок ЭГ-4, ЭГ-61А, ЭГ-74 и ЭГ-6 при работе на холостом ходе и под нагрузкой. Наибольшее сопротивление ПП обеспечивают щётки ЭГ-74 и ЭГ-61А.

9. Предложена методика ускорения образования ПП в многощёточных системах за счёт включения в систему токопередачи щёток, обладающих повышенной скоростью образования ПП. Объективность методики подтверждена результатами лётных и моторных испытаний, получен патент на полезную модель.

10. Генератор ГС-12 ТОК с ПОЩ ЭГ-61А (пропитанными) с хорошими результатами прошёл эквивалентно-циклические ресурсные стендовые испытания на вспомогательном газотурбинном двигателе ТА12(А) с приводом, имеющим обгонную муфту, отключающую его после окончания стартового режима. Нарботка составила 8250 запусков в течении 1046 часов с относительно низким износом щёток, увеличенным сопротивлением ПП.

11. ПОЩ ЭГ-74 при пониженном давлении на все щётки (500 – 550 г) по результатам лётных испытаний не могут быть рекомендованы в серийное производство из-за появления сколов в процессе эксплуатации.

12. ПОЩ ЭГ-74 при штатном давлении на токоведущие щётки и пониженном давлении на ПОЩ (500 – 550 г) обеспечивают увеличение ресурса более чем в два раза, однако не приводят к ускорению процесса образования ПП и не рекомендуются к внедрению в серийное производство.

13. Генератор, оборудованный ПОЩ ЭГ-61А (пропитанными) при штатном давлении на все щётки обеспечивает увеличение ресурса токоведущих щёток более чем в два раза без увеличения скорости образования ПП. Генератор с ПОЩ ЭГ-61А (не пропитанными) при давлении на все щётки 500 - 550 г обеспечивает увеличение ресурса щёток до пяти раз с увеличением скорости образования ПП и рекомендуется в серийное производство. Для принятия окончательного решения о внедрении в серийное производство модернизированного генератора проводятся испытания по дополнительной программе.

14. В настоящее время проводятся испытания по утверждённой заводом программе. Результаты испытаний на ударную прочность опытного генератора, оборудованного щётками МГС-7 и ЭГ-61А с давлением на щётки 500-550г приведены в протоколе испытаний №139 от 13.06.2017 (приложение IX).

## **ГЛАВА 4. СНИЖЕНИЕ ИЗНОСА ТОКОВЕДУЩИХ ЩЁТОК В КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **4.1 Методика определения оптимального положения токоведущих щёток по уровню искрения в коллекторных электрических машинах переменного тока**

Как известно, износ щёток зависит от степени искрения [118]. Снижение степени искрения под токоведущими щётками в коллекторных машинах без дополнительных полюсов может быть достигнуто за счёт смещения щёток с геометрической нейтрали [60]. В коллекторных машинах переменного тока этот способ имеет ограниченное применение, т.к. в большинстве случаев щёткодержатели жёстко установлены в корпусе. Для этих машин нами разработана методика определения оптимального положения щёток (по минимальной степени искрения) за счёт смещения магнитной системы (щётки находятся в штатном положении) [63]. Для смещения магнитной системы электродвигателя проводится расточка корпуса по внутреннему диаметру, на корпусе изготавливаются две прорези, сдвинутые одна относительно другой на  $180^\circ$ . В магнитную систему вворачиваются два болта для её поворота и фиксации. Конструкция даёт возможность смещать магнитную систему относительно корпуса по и против направления вращения якоря, с фиксацией магнитной системы.

При различных положениях магнитной системы снимаются рабочие характеристики с оценкой искрения под сбегающим краем щёток в соответствии с ГОСТ Р51318.14.1-2006. После нахождения оптимального положения магнитной системы, соответствующего минимальному искрению, проводится смещение коллектора в необходимом направлении за счёт изменения его ориентации относительно центра паза якоря или изменения порядка подсоединения секций к коллекторным пластинам (рис. 4.1).



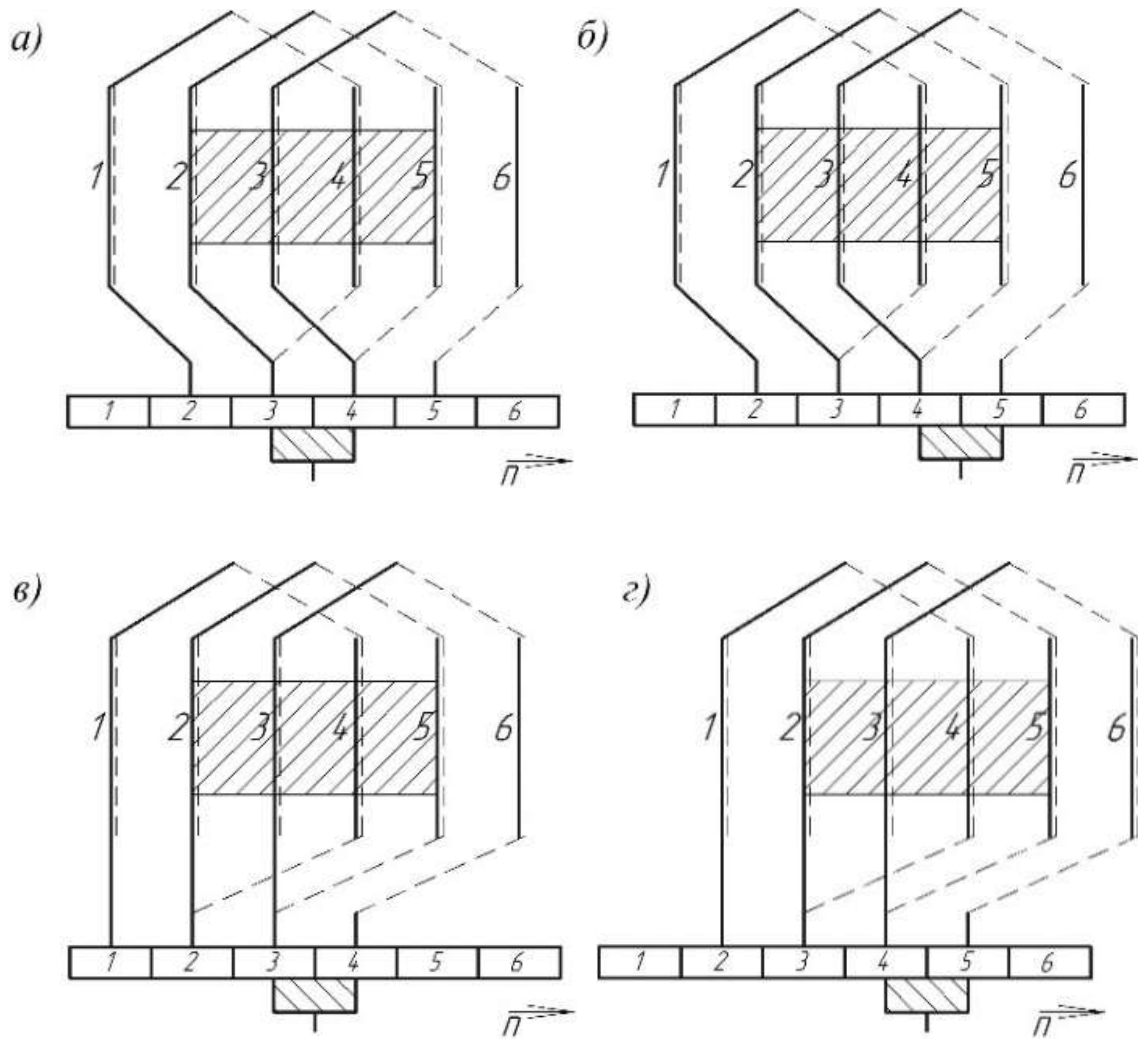


Рис. 4.1. Варианты смещения щёток

- а) щётки на геометрической нейтрали;
- б) смещение щёток по направлению вращения на одно коллекторное деление;
- в) смещение щёток по направлению вращения на одно коллекторное деление за счёт переподсоединения секций;
- г) смещение щёток по направлению вращения на одно коллекторное деление за счёт сдвига коллектора относительно центра паза якоря против направления вращения (подсоединение к коллектору не изменяется).

Опыты проводились на ОА «Электромашиностроительный завод «Лепсе» г. Киров. Класс точности измерительных приборов не хуже 0,5. Погрешность электронного прибора для измерения уровня радиопомех  $\pm 2$  дБ. В исследованиях участвовали коллекторные двигатели переменного тока привода угловых шлифовальных машин мощностью 1,8 кВт (МШУ-1,8-230 с номинальной частотой вращения 14000 об/мин), 2 кВт (МШУ-2-230П с

номинальной частотой вращения 18000 об/мин), 2,4 кВт (МШУ-2,4-230М с номинальной частотой вращения 18000 об/мин) После определения оптимального положения магнитной системы, были изготовлены опытные якоря, обеспечивающие смещение щёток по и против направления вращения (за счёт переподсоединения секций к коллектору). Далее снимались рабочие характеристики, определялась степень искрения и уровень радиопомех по мощности и напряжению.

В двигателе мощностью 1,8 кВт минимальное искрение было получено при смещении щёток на одно коллекторное деление по направлению вращения (при постоянном тормозном моменте). Искрение в номинальном режиме стало меньше, чем при штатном положении щёток на один балл. Однако, смещение щёток привело к уменьшению частоты вращения за счёт подмагничивания магнитной системы продольной составляющей реакции якоря (при постоянном тормозном моменте). Это ухудшило охлаждение и двигатель стал перегреваться (табл. 4.1). Для устранения перегрева была рассмотрена возможность увеличения частоты вращения за счёт снятия пяти витков обмотки возбуждения с каждого полюса.

Для исследования было взято три угловых шлифовальных машины МШУ-1,8-230, у которых были сняты рабочие характеристики и уровень радиопомех (табл. 4.2, 4.3, 4.4). Затем были проведены испытания на нагревание, в которых измерялись: перегрев обмотки возбуждения, перегрев обмотки якоря, нагрев коллектора и частота вращения при постоянной потребляемой мощности 1800 Вт (табл. 4.1). После испытаний на нагревание у штатных двигателей были заменены якоря на якоря со смещением щёток за счёт переподсоединения секций к коллектору по рис. 4.1 (в), уменьшено число витков обмотки возбуждения (85 вместо 90), сняты уровень радиопомех по мощности и напряжению (табл. 4.3, 4.4) и рабочие характеристики (табл. 4.2).

Как показали исследования, применение в двигателе угловой шлифовальной машины МШУ-1,8-230 обмотки возбуждения с числом витков в катушке 85 вместо 90 возможно при смещении щёток по направлению

вращения на одно коллекторное деление. Это приводит к увеличению частоты вращения с некоторым повышением  $\cos\phi$  (табл. 4.2), степень искрения остаётся без изменения. Уровень радиопомех увеличился при частоте 3,5; 45; 150; 180 МГц на 7; 7,6; 9,1; и 7,5 дБ соответственно (табл. 4.3, 4.4).

Модернизированный двигатель мощностью 1,8 кВт, а также его модификации мощностью 2; 2,2 кВт с уменьшенным числом витков обмотки возбуждения (соответственно на 10, 10 и 5 витков на каждый полюс) внедрены в серийное производство. По результатам паспортной работы, проведённой АО «Лепсе» степень искрения в модернизированных машинах была на 1 балл меньше, чем при установке щёток на геометрическую нейтраль. Получен реальный годовой экономический эффект при программе выпуска 330000 шт в год в размере 2674169 руб. Получен акт внедрения в серийное производство [Приложение V].

В таблице 4.5 представлены рабочие характеристики двигателя мощностью 2 кВт привода угловой шлифовальной машины МШУ-2-230П (с номинальной частотой вращения двигателя 18000 об/мин). Смещение щёток против направления вращения на одно коллекторное деление позволило снизить искрение по всем режимам на один балл. Уровень радиопомех по мощности и напряжению отличается незначительно и находится в пределах погрешности измерений (табл. 4.6, 4.7). Предлагаемая модернизация внедрена в серийное производство, получен акт о внедрении в серийное производство на АО «Лепсе» [Приложение VI].

У коллекторных двигателей переменного тока мощностью 2,4 кВт минимальное искрение наблюдалось в случае смещения щёток на 0,85 мм по направлению вращения.

Таким образом, в результате проведённых исследований разработана методика определения оптимального положения щёток в коллекторных машинах переменного тока за счёт смещения магнитной системы в корпусе. Экспериментально доказана возможность снижения искрения (в некоторых случаях) за счёт смещения щёток с геометрической нейтрали по направлению

вращения при постоянном тормозном моменте с улучшением технико-экономических показателей за счёт использования подмагничивающего эффекта продольной реакции якоря, позволяющего уменьшить число витков обмотки возбуждения.

Таблица 4.1 - Усреднённые значения перегревов трёх двигателей МШУ-1,8-230 при постоянной потребляемой мощности 1800 Вт

Условия опыта	Серийный двигатель	Смещение щёток на 1 коллекторное деление по направлению вращения
Перегрев обмотки возбуждения, °С	74±2 <sup>а</sup>	77±3
	65 <sup>б</sup>	70
Перегрев обмотки якоря, °С	78±4	82±8
	75±3	75±6
Нагрев коллектора, °С	116±4	119±5
	106±6	115±6

<sup>а</sup>верхняя строка – катушка обмотки возбуждения 90 витков (как у серийной машины);

<sup>б</sup>нижняя строка – катушка обмотки возбуждения 85 витков

Таблица 4.2 - Рабочие характеристики двигателя МШУ-1.8-230

Характеристика	Значение					
	670	1000	1340	1520	1730	1800
P <sub>1</sub> <sup>*</sup> , Вт	670	1000	1340	1520	1730	1800
P <sub>1</sub> <sup>**</sup> , Вт	642	930	1320	1510	1700	1800
I, <sup>*</sup> А	2.63	4.75	6.5	7.5	8.7	9.3
I <sup>**</sup> , А	2.5	4.4	6.5	7.5	8.6	9.1
n <sup>*</sup> , об/мин	21557	17170	15262	14598	14048	13487
n <sup>**</sup> , об/мин	21354	17018	14834	14111	13111	12786
cosφ <sup>*</sup>	0.99	0.96	0.94	0.92	0.90	0.88
cosφ <sup>**</sup>	0.99	0.96	0.92	0.92	0.90	0.90
КПД <sup>**</sup> / КПД <sup>*</sup>	1.03	1.07	0.99	0.97	0.95	0.95

\* - серийный двигатель;

\*\* -значения при смещении щёток на 1 коллекторное деление по направлению вращения, число витков обмотки возбуждения 85.

Таблица 4.3 - Уровень радиопомех по напряжению МШУ-1,8-230

Частота, МГц	Уровень радиопомех по ГОСТ Р51318.14.1-2006, дБ	Уровень радиопомех серийного двигателя, дБ	Уровень радиопомех при смещении щёток по рис. 1в, число витков обмотки возбуждения $W_s=85$ , дБ
0,16	75,44	47	50
0,24	72,1	51	50
0,55	69	43	45
1,0	69	36	36
1,4	69	39	36
2,0	69	40	38
3,5	69	36	43
6,0	74	42	40
10	74	45	42
22	74	27	30
30	74	27	30

Таблица 4.4 - Уровень радиопомех по мощности МШУ-1,8-230

Частота, МГц	Уровень радиопомех по ГОСТ Р51318.14.1-2006, дБ	Уровень радиопомех серийного двигателя, дБ	Уровень радиопомех при смещении щёток по рис. 1в, число витков обмотки возбуждения $W_s=85$ , дБ
30	55	37,4	38..41
45	55,6	34,4	42
65	56,3	43,4	42
90	57,2	36,4	34..37
150	59,5	33,9	40..43
180	60,6	30,5	36..38
220	62,1	28,1	27..29
300	65	28,8	26

Таблица 4.5 - Рабочие характеристики двигателя МШУ-2-230П

№ п/п	Условия опыта	Характеристики				
		М, кгс·см	I, А	P <sub>1</sub> , кВт	n, об/мин	Степень искрения, балл
1	Серийный двигатель	0	4,5	0,96	21000	2
2	Смещение щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения.		5,3	1,12	22930	1 ½
3	Серийный двигатель	10	6,8	1,4	18930	2
4	Смещение щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения.		6,9	1,48	20400	1 ½
5	Серийный двигатель	20	8,7	1,8	17480	1 ½
6	Смещение щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения.		9	1,9	18490	1 ¼
7	Серийный двигатель	30	10,7	2,2	16210	2
8	Смещение щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения.		11	2,3	17070	1 ½

Таблица 4.6 - Уровень радиопомех по напряжению МШУ-2-230П

Частота, МГц	Уровень радиопомех по ГОСТ P51318.14.1-2006, дБ	Уровень радиопомех серийного двигателя, дБ	Уровень радиопомех при смещении щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения, дБ
0,16	70	55	53
0,24	66	48	46
0,55	60	45	45
1,0	59	46	46
1,4	58	40	40
2,0	57	34	30
3,5	56	32	32
6,0	52	39	40
10	52	40	40
22	52	26	26
30	52	12	10

Таблица 4.7 - Уровень радиопомех по мощности МШУ-2-230П

Частота, МГц	Уровень радиопомех по ГОСТ Р51318.14.1-2006, дБ	Уровень радиопомех серийного двигателя, дБ	Уровень радиопомех при смещении щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения, дБ
30	55	39,4	39,4
45	55,6	39,4	39,4
65	56,3	39,4	40,4
90	57,2	28,4	29,4
150	59,5	38,9	40,9
180	60,6	30,5	31,5
220	62,1	27,1	28,1
300	65	28,8	28,8

#### 4.2 Причины снижения искрения токоведущих щёток при не традиционном смещении их по направлению вращения якоря

Для анализа причины снижения искрения в коллекторных электрических машинах переменного тока при нетрадиционном смещении щёток по направлению вращения и отсутствия в некоторых случаях эффективности смещения щёток против направления вращения рассмотрены процессы, происходящие в коммутируемой секции при постоянном тормозном моменте в трёх случаях: щётки установлены на геометрической нейтрали, щётки смещены по направлению вращения, щётки смещены против направления вращения (рис. 4.2, 4.3, 4.4) [83]. На рисунках указаны: МДС реакции якоря по продольной и поперечной осям  $F_{ad}$  и  $F_{aq}$ , ЭДС индуктируемые в коммутируемых секциях (при работе машины в режиме двигателя) и их направление (влияние трансформаторной ЭДС на коммутацию не рассматривается).

На рисунках приняты следующие обозначения:

- $e_p$  - реактивная ЭДС,

$$e_r = 2W_c \cdot V \cdot A \cdot \xi_r; \quad (1)$$

где  $W_c$  - число витков в секции;

$V$  - линейная скорость вращения якоря;

$A$  - линейная нагрузка;

$\xi_r$  - проводимость для полей рассеяния, замыкающихся вокруг коммутируемой секции, которая за счёт насыщения зубцовой зоны нелинейно связана с током якоря.

- $e_{aq}$  - ЭДС вращения, обусловленная полем поперечной реакции якоря,

$$e_{aq} = 2W_c \cdot B_{aq} \cdot V \cdot L; \quad (2)$$

где  $B_{aq}$  - индукция, обусловленная поперечной МДС реакции якоря, которая нелинейно связана с током якоря за счёт определённого насыщения магнитной системы.

- $e_k$  - ЭДС вращения от поля главных полюсов,

$$e_k = 2W_c \cdot B_k \cdot l \cdot V_a; \quad (3)$$

где  $B_k$  - индукция, обусловленная полем главных полюсов.



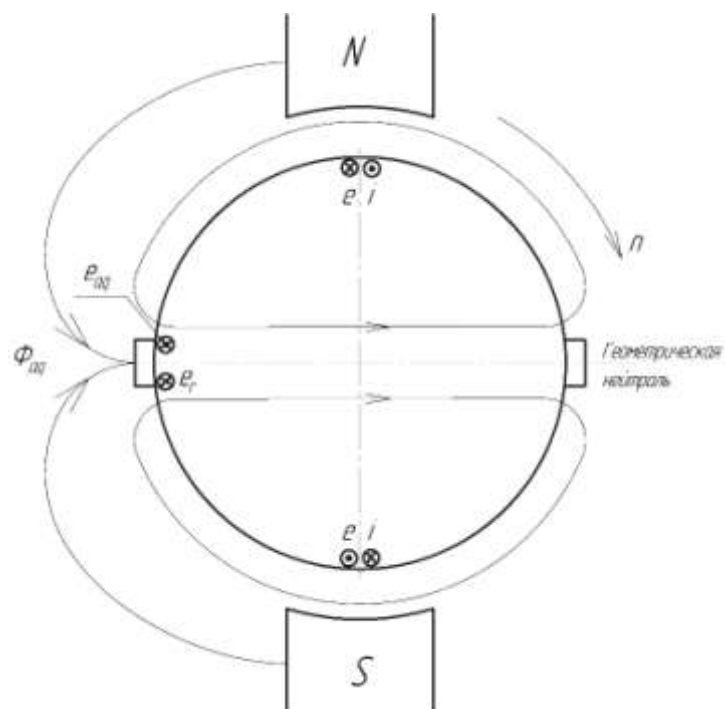


Рис. 4.2. Щётки на геометрической нейтрали

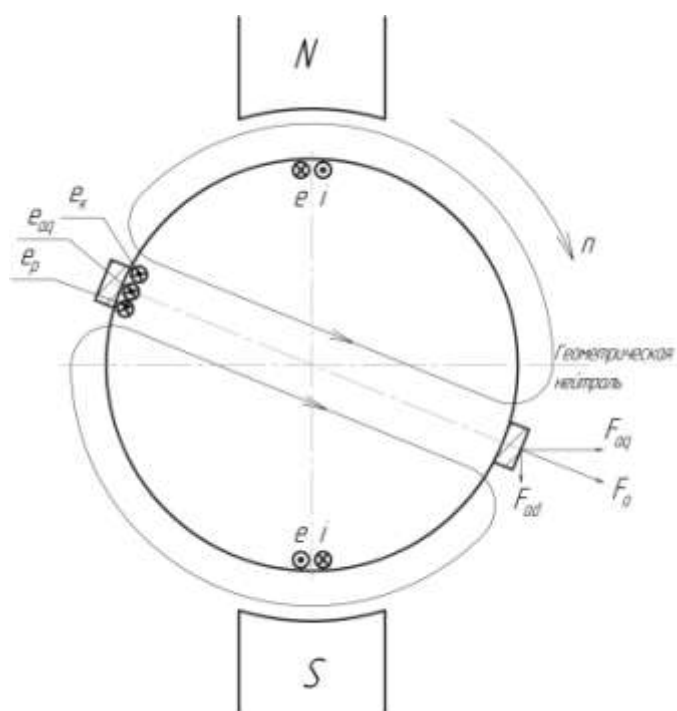


Рис. 4.3. Смещение щёток по направлению вращения

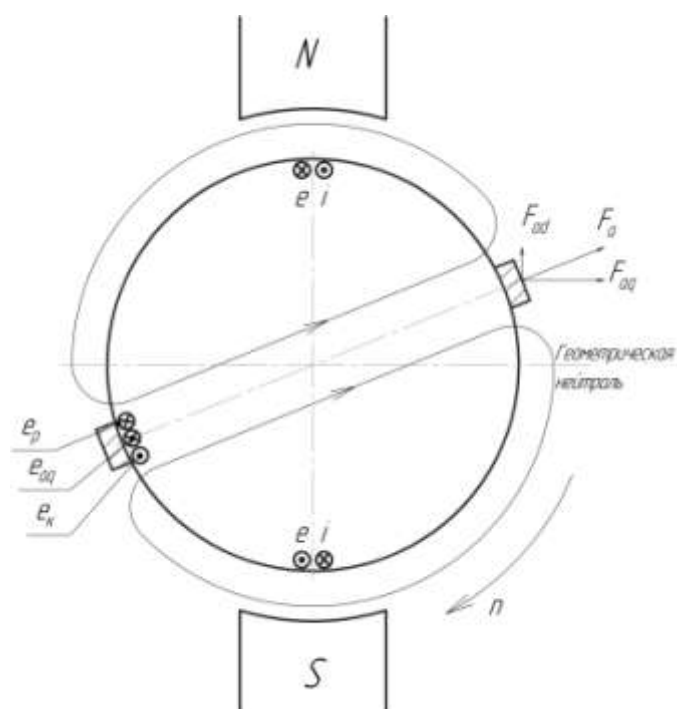


Рис. 4.4. Смещение щёток против направления вращения

При анализе делается допущение, что магнитные поля, созданные реакцией якоря и главными полюсами существуют раздельно.

Как известно [60], смещение щёток с геометрической нейтрали независимо от направления приводит к уменьшению полезного потока, создаваемого главными полюсами, который участвует в создании ЭДС параллельной ветви якорной обмотки и электромагнитного момента (рис. 4.5). На полезный поток главных полюсов определённое влияние оказывает характер коммутации за счёт коммутационной реакции якоря. При прямолинейной коммутации влияние коммутационной реакции якоря отсутствует. При ускоренной коммутации коммутационная реакция якоря размагничивает магнитную систему, уменьшая полезный магнитный поток, а при замедленной – подмагничивает (рис. 4.6, 4.7). Ускорение процесса реверса тока в коммутируемой секции относительно исходного состояния при замедленной коммутации приводит к уменьшению коммутационной реакции якоря и снижению эффекта подмагничивания магнитной системы.

При смещении щёток с геометрической нейтрали по и против направления вращения возникает продольная реакция якоря  $F_{ад}$ , которая в

первом случае подмагничивает магнитную систему, а во втором размагничивает (рис. 4.3, 4.4, 4.7).

Таким образом, на изменение полезного магнитного потока двигателя активно влияет смещение щёток с геометрической нейтрали, продольная реакция якоря и коммутационная реакция якоря.

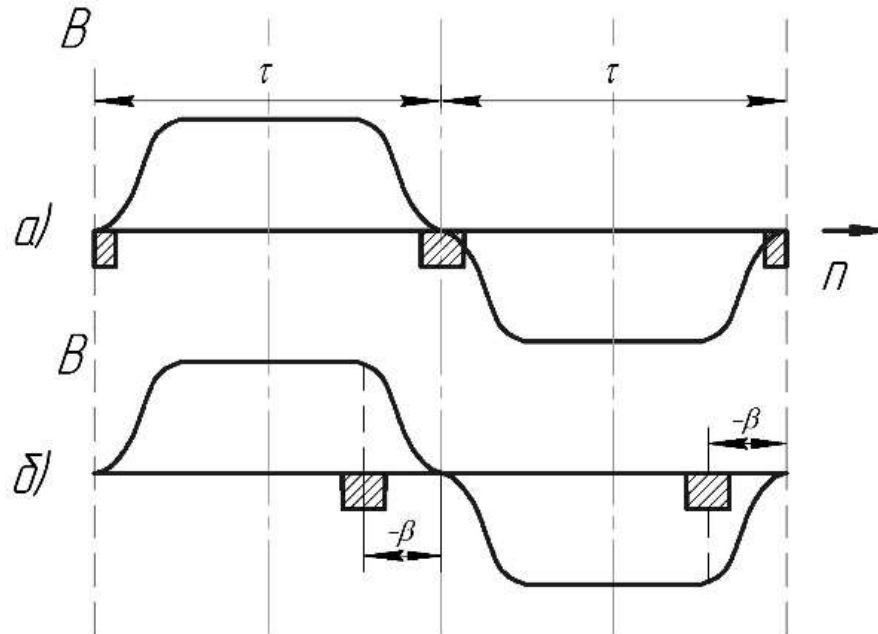
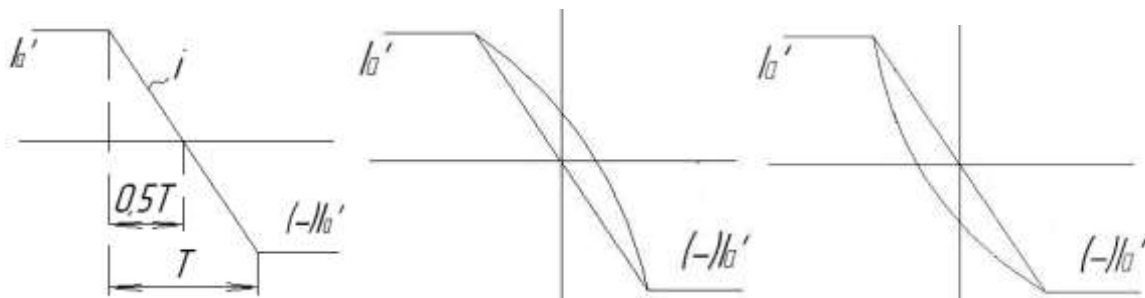


Рис. 4.5. Влияние смещения щёток на полезный магнитный поток  
 а) Щётки на геометрической нейтрали  
 б) Смещение щёток против направления вращения  
 $\beta$  - величина смещения щёток



1) Прямолинейная коммутация

$$\sum e = e_r - e_k \quad (e_r = e_k) \quad i_k = 0$$

2) Замедленная коммутация

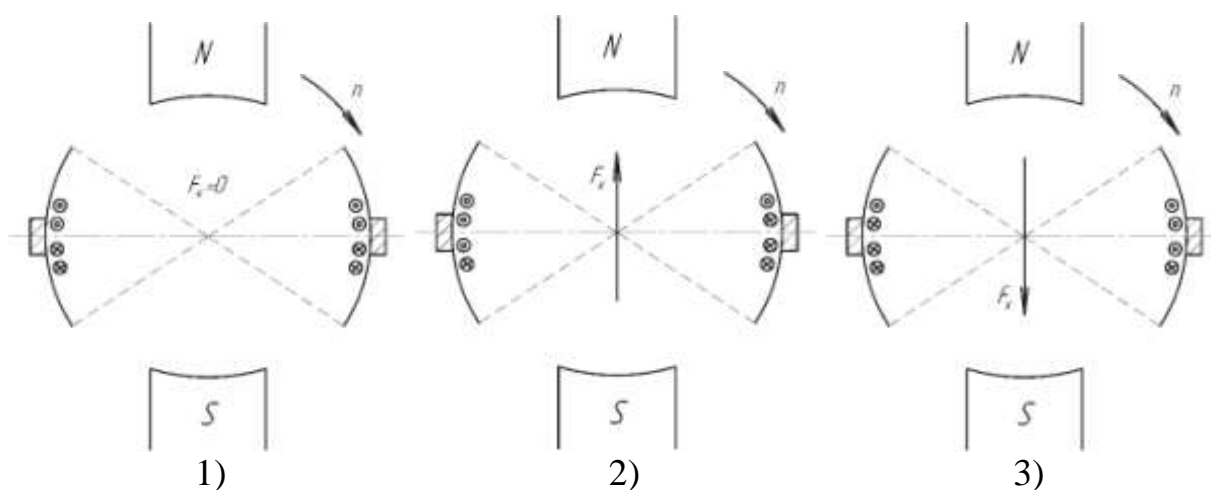
$$\sum e = e_r - e_k \quad (|e_r| > |e_k|) \\ i = i_n + i_k$$

3) Ускоренная коммутация

$$\sum e = e_r - e_k \quad i = i_n - i_k$$

$i_n$  – ток прямолинейной коммутации;  
 $i_k$  – добавочный ток коммутации.

Рис. 4.6. Виды коммутации



1)  $F_k = 0$

2) Ускоренный характер ( $F_k$  будет размагничивать магнитную систему)

3) Замедленный характер

( $F_k$  будет подмагничивать магнитную систему)

Рис. 4.7. Влияние намагничивающей силы коммутационной реакции якоря на основной поток машины

Следовательно, при смещении щёток по направлению вращения с геометрической нейтрали будет происходить уменьшение магнитного потока за счёт смещения щёток, за счёт ускорения процесса коммутации (искрение уменьшается) и увеличения магнитного потока под действием продольной составляющей реакции якоря. В таблице 4.8 представлены рабочие характеристики коллекторного двигателя переменного тока мощностью 1,8 кВт привода угловой шлифовальной машины (МШУ-1,8-230) при смещении щёток по направлению вращения и против направления вращения на одно коллекторное деление и для случая, когда щётки находятся на геометрической нейтрали. При смещении щёток по направлению вращения в случае постоянного тормозного момента наблюдается уменьшение тока якоря и уменьшение частоты вращения. Это позволяет сделать заключение об активном влиянии продольной реакции якоря на электромагнитный момент. То есть под действием МДС продольной реакции якоря произошло увеличение полезного магнитного потока на большую величину, чем исходное значение, в связи с чем произошло уменьшение потребляемого тока.

При смещении щёток против направления вращения идёт уменьшение полезного магнитного потока за счёт эффекта смещения, за счёт размагничивающего действия продольной реакции якоря и поскольку наблюдается повышенное искрение, происходит увеличение полезного магнитного потока из-за возрастания коммутационной реакции якоря. Сохранение постоянного электромагнитного момента обеспечивается увеличением потребляемого тока. При этом увеличение момента будет происходить в основном за счёт увеличения тока, так как частота вращения увеличивается.

Таблица 4.8 - Рабочие характеристики МШУ-1,8-230 при смещении щеток и постоянном тормозном моменте

№	Условия эксперимента	Рабочие характеристики при номинальной нагрузке					
		Степень искрения, балл	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/мин	$P_{I_{ном}},$ Вт	$\cos\varphi,$ о.е.	$\eta,$ %
1	Смещение на одно коллекторное деление против направления вращения	2	8,7	16200	1700	0,909	67,5
2	Щетки на нейтрали	2	8,4	15760	1660	0,898	71,9
3	Смещение на одно коллекторное деление по направлению вращения	1 ½	8,14	15530	1600	0,898	75,5

Из анализа приведённых данных можно сделать предположение, что ведущим фактором, обеспечивающим изменение рабочих характеристик двигателей переменного тока при смещении щёток, является действие продольной составляющей реакции якоря.

Как известно [83], причиной искрения электромагнитного характера является электромагнитная энергия  $A$ , запасённая в коммутационном контуре в момент, предшествующий его разрыву щёткой. Если в момент, предшествующий окончанию коммутационного процесса запас

электромагнитной энергии окажется больше критического значения ( $A > A_{крит}$ ) возникает искрение.

$$A = L_r \frac{i_k^2}{2}, \quad (4)$$

где:  $i_k$  - добавочный ток в коммутируемой секции;

$$i_k = \frac{\sum E}{r_1 + r_2} \quad (5)$$

$L_r$  - коэффициент результирующей самоиндукции секции;

$r_1, r_2$  - сопротивления перехода щётка-коллектор в набегающем и сбегающем краях.

$\sum E$  – суммарная ЭДС коммутируемого контура:

$$\sum E = e_{aq} + e_r \pm e_k \quad (6)$$

При смещении щёток по и против направления вращения возникает ЭДС, обусловленная полем главных полюсов  $e_k$ . При смещении щёток против направления вращения  $e_{aq}$ ,  $e_r$  действуют встречно с  $e_k$  которая ускоряет коммутацию, а при смещении по направлению вращения – согласно, делая коммутацию более замедленной.

ЭДС  $e_{aq}$ ,  $e_r$  и  $e_k$  нелинейно связаны с током за счёт насыщения элементов магнитной системы.

Смещение щёток против направления вращения, как видно из рабочих характеристик (таблица 4.8), связано с увеличением частоты вращения и потребляемым током (при постоянном тормозном моменте на валу), что приводит к увеличению ЭДС  $e_{aq}$  и  $e_r$ . ЭДС  $e_k$  также увеличивается, однако при определённой степени насыщения магнитной системы и зубцовой зоны, а также

величины отношения  $\frac{b_{кз}}{\tau - b}$  (где  $b_{кз}$  - ширина зоны коммутации,  $\tau$  - полюсное деление,  $b$  - ширина полюсного наконечника) и эксцентричным магнитным

зазором между полюсным наконечником и якорем приращения  $e_{aq}$  и  $e_r$  могут быть не скомпенсированы ЭДС  $e_k$ . То-есть снижение искрения будет отсутствовать и даже может увеличиться, что и наблюдается при проведении исследований.

При смещении щёток по направлению вращения все три ЭДС действуют согласно, однако уменьшение тока и частоты вращения (при постоянном тормозном моменте на валу) за счёт уменьшения  $e_{aq}$  и  $e_r$  даже при появлении  $e_k$  может привести к уменьшению суммарной ЭДС коммутируемого контура и улучшению коммутации (снижению искрения).

Таким образом, проведённые исследования позволяют сделать заключение о возможности в некоторых случаях улучшать коммутацию в коллекторных машинах переменного тока за счёт смещения щёток по направлению вращения, что позволяет улучшить технико-экономические показатели двигателя (уменьшить число витков обмотки возбуждения и  $\cos\phi$ ) за счёт использования продольной подмагничивающей реакции якоря. Коэффициент насыщения магнитной системы двигателей мощностью 1,8; 2 и 2,4 кВт по результатам расчёта АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе» равен 4,73; 5,14 и 5,03 соответственно, коэффициент насыщения зубцовой зоны – 2,01; 2,05; 1,62. Определённое влияние на характер коммутации будет оказывать и трансформаторная ЭДС.

#### **4.3 Влияние применения реактивного щёткодержателя на снижение износа токоведущих щёток и уровень радиопомех**

На износы щёток и уровень радиопомех активное влияние оказывает состояние механики контакта щётка-коллектор [63]. При плохом механическом контакте из-за неустойчивой работы щётки возникает дуга подъёма, которая приводит к повышенному износу щёток. Это особенно актуально для электрических машин, у которых на коллекторе установлены две щётки. Для улучшения механики контакта щётка-коллектор нами разработана конструкция щёточно-коллекторного узла, в котором радиальная щётка смещается по

направлению вращения коллектора параллельно радиальному положению на половину тангенциального размера щётки [70]. Установка щёток на нейтраль в этом случае достигается путём смещения коллектора по направлению вращения относительно магнитной системы якоря на величину смещения центра контактной дуги щётки.

На рисунке 4.8 представлена конструкция радиального щёткодержателя, на рисунке 4.9 – модернизированного. В случае применения радиального щёткодержателя на набегающий край щётки будет действовать сила  $F$  по касательной от выступающих пластин коллектора, которая может быть разложена на две составляющие  $F_1$  и  $F_2$ . Сила  $F_1$  отрывает щётку от коллектора, а сила  $F_2$  прижимает её к щёткодержателю.

В предложенной конструкции (рис. 4.9) сила  $F_1$  будет отсутствовать, что обеспечивает большую стабильность контакта щётка-коллектор. Проверка эффективности модернизированного щёткодержателя была проведена на опытных образцах, изготовленных ОАО «Электромашиностроительный завод «Лепсе» г. Киров на базе коллекторного двигателя переменного тока мощностью 2,2 и 2 кВт (МШУ-2,2-230 и МШУ-2-230П). Компенсация сдвига щёток проводилась за счёт смещения коллектора относительно магнитной системы якоря. Опыты проводились как на продороженном, так и непродороженном коллекторах. В таблицах 4.9 и 4.10 приведены уровни радиопомех по напряжению и по мощности при испытаниях коллекторного двигателя переменного тока мощностью 2 кВт (МШУ-2-230П).



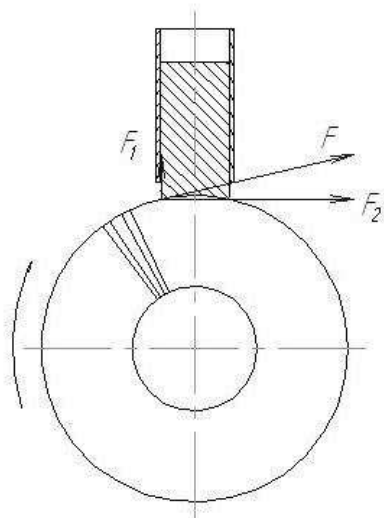


Рис. 4.8. Радиальный щёткодержатель

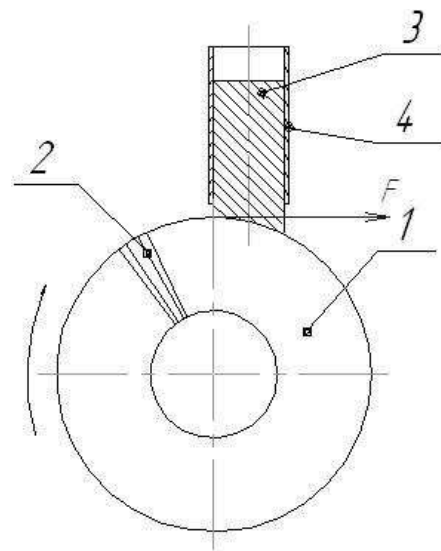


Рис. 4.9. Модернизированный щёткодержатель

- 1 – продороженный коллектор
- 2 – коллекторные пластины
- 3 – токоведущая щётка
- 4 - щёткодержатель

Таблица 4.9 - Уровень радиопомех по напряжению МШУ-2-230П (коллектор продорожен)

Частота, МГц \ Уровень радиопомех, дБ	0,16	0,24	0,55	1,0	1,4	2,0	3,5	6,0	10	22	30
По ГОСТ Р51318.14.1-99	70	66	60	59	58	57	56	52	52	52	52
Радиальный щёткодержатель	57	52	53	54	49	39	34	43	48	32	23
Модернизированный щёткодержатель	50	44	42	44	38	29	25	33	44	9	7

Таблица 4.10 - Уровень радиопомех по мощности МШУ-2-230П (коллектор продорожен)

Частота, МГц \ Уровень радиопомех, дБ	30	45	65	90	150	180	220	300
По ГОСТ Р51318.14.1-99	55	55,6	56,3	57,2	59,5	60,6	62,1	65
Радиальный щёткодержатель	41,4	33,4	45,4	33,4	31,9	36,5	24,1	25,8
Модернизированный щёткодержатель	40	32,4	43	32	30	34	23	23

Во всех случаях наблюдается снижение уровня радиопомех по напряжению. Применение модернизированного щёткодержателя привело к снижению износа щёток на 35%. Получен акт промышленных испытаний угловой шлифовальной машины МШУ-2,4-230М в случае применения СЩ, выполненных на основе дисульфида молибдена и смещения токовых щёткодержателей параллельно штатному положению по направлению вращения на 0,85 мм (приложение VII).

В таблицах 4.11, 4.12 приведены результаты аналогичных исследований, проведённых на МШУ-2,2-230, когда использовались продороженные якоря. По большинству частот наблюдается снижение радиопомех по мощности и по напряжению. В случае применения непродороженного коллектора радиопомехи остаются неизменными, что подтверждает наличие активного влияния смещения щёткодержателей на стабильность работы щёточного контакта.

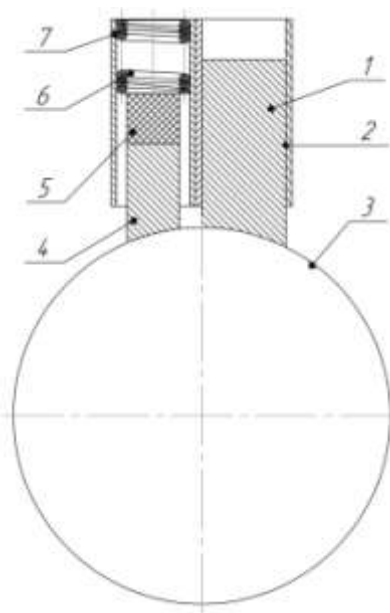
Таблица 4.11 - Уровень радиопомех по напряжению МШУ-2,2-230

Частота, МГц \ Уровень радиопомех, дБ	0,16	0,24	0,55	1	1,4	2	3,5	6	10	22	30
По ГОСТ Р51318.14.1-99	70	66	60	59	58	57	56	52	52	52	52
Радиальный щёткодержатель	44	44	37	31	33	36	42	40	43	33	34
Модернизированный щёткодержатель	44	44	37	31	33	31	32	36	33	22	22

Таблица 4.12 - Уровень радиопомех по мощности МШУ-2,2-230

Частота, МГц \ Уровень радиопомех, дБ	30	45	60	90	150	180	220	300
По ГОСТ Р51318.14.1-99	55	55,6	56,3	57,2	59,5	60,6	62,1	65
Радиальный щёткодержатель	45,4	44,4	39,4	43,3	36,9	37,5	34,1	24,9
Модернизированный щёткодержатель	36,4	37,4	39,4	28,4	25,9	21,5	20,1	21,8

На МШУ-2,4-230М за счёт повышенной вибрации со стороны редуктора наблюдалась нестабильность радиопомех по мощности и напряжению. Разброс показаний при замерах достигал 30 – 40 дБ (в соответствии с инструкцией допустимое отклонение  $\pm 2$  дБ). Смещение щёткодержателей позволило уменьшить разброс показаний уровня радиопомех только по некоторому ряду частот. В связи с этим была проведена дальнейшая модернизация щётчного узла – изготовлен щёткодержатель, у которого на набегающем крае токового щёткодержателя располагается дополнительный щёткодержатель, выполненный из изоляционного материала (рис. 4.10). В дополнительный щёткодержатель установлена СЩ, выполненная на основе дисульфида молибдена. Установка СЩ в сочетании со смещением щёткодержателей обеспечила стабильное значение радиопомех по мощности и напряжению и соответствие их значениям ГОСТ (табл. 4.13, 4.14), а также дала увеличение ресурса токоведущих щёток в два раза.



1- Токоведущая щётка; 2 – основной щёткодержатель; 3 – коллектор; 4 – смазывающая щётка; 5 – текстолитовая вставка; 6 – пружина смазывающей щётки; 7 – дополнительный щёткодержатель

Рис. 4.10. Основной и дополнительный щёткодержатели

Таблица 4.13 - Уровень радиопомех по мощности МШУ-2,4-230М

Частота, МГц \ Уровень радиопомех, дБ	30	45	65	90	150	180	220	300
По ГОСТ Р51318.14.1-99	55	55,6	56,3	57,2	59,5	60,6	62,1	65
Серийная машина	50-55	большие отклонения значений						
Смещённый щёткодержатель на 4мм, коллектор со смещением.	38	27-31	32	36-41	33	30	28	27
Смещённый щёткодержатель на 4мм, коллектор со смещением. Установлена СЦ.	37	33	33	35	32	30	28	26

Таблица 4.14 - Уровень радиопомех по напряжению МШУ-2,4-230М

Частота, МГц \ Уровень радиопомех, дБ	0,16	0,24	0,55	1	1,4	2	3,5	6	10	22	30
По ГОСТ Р51318.14.1-99	70	66	60	59	58	57	56	52	52	52	52
Серийная машина	большие отклонения значений										
Смещённый щёткодержатель на 4мм, коллектор со смещением. Установлена СЦ	49	48	50	45	41	38	33	37	27	33	19

Таким образом, применение модернизированного щёткодержателя, смещённого по направлению вращения коллектора параллельно своему радиальному положению на величину равную половине ширины щётки, улучшает механику контакта щётка-коллектор снижая износы щёток и уровень радиопомех.

## **Выводы по главе 4**

1. Разработана методика определения оптимального положения щёток по степени искрения в коллекторных машинах переменного тока с щёткодержателями неподвижно установленными в корпусе двигателя за счёт смещения магнитной системы.

2. Приведены результаты исследований с использованием предлагаемой методики по снижению искрения щёток в коллекторных двигателях переменного тока за счёт смещения щёток с геометрической нейтрали по направлению вращения у МШУ-1,8-230 и МШУ-2,4-230М и против направления вращения у МШУ-2-230П. Степень искрения в модернизированных двигателях при оптимальном положении щёток на 1 балл меньше, чем при установке щёток на геометрическую нейтраль.

3. Внедрены в серийное производство двигатели трёх мощностей: 1,8; 2; 2,2 кВт привода угловых шлифовальных машин, имеющих смещение щёток по направлению вращения на одно коллекторное деление с уменьшенным числом витков обмотки полюсов с реальным годовым экономическим эффектом 2,7 млн. руб. (2006г), искрение на 1 балл меньше, чем при штатном исполнении. Получен акт внедрения в серийное производство [приложение V].

4. Двигатель привода МШУ-2-230П со смещением щёток против направления вращения внедрён, получен акт внедрения в серийное производство [приложение VI].

5. Разработана конструкция щёточного узла, обеспечивающая повышенную механическую устойчивость контакта щётка-коллектор, снижение радиопомех по мощности и напряжению, а также износ щёток. Эффективность подтверждена актом промышленных испытаний [приложение VII].

## **ГЛАВА 5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗЫВАЮЩИХ ЩЁТОК, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА В КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **5.1 Влияние материала коллектора на его температуру и эффективность применения смазывающих щёток**

Ранее проведённые исследования на коллекторных двигателях переменного тока привода шлифовальных машин мощностью 1,8; 2 и 2,2 кВт, в коллекторных машинах постоянного тока общепромышленного применения, в коллекторных двигателях постоянного тока, предназначенных для работы в высотных условиях показали возможность значительного снижения износа щёток за счёт установки СЩ на коллекторах из профиля марки ПКМ (профили коллекторные медные), выполненных на основе дисульфида молибдена [82, 94].

Проведённые работы в соответствии с паспортом № МКВИ.11-625 (АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе») вновь спроектированного коллекторного двигателя переменного тока мощностью 2,4 кВт МШУ-2,4-230М (номинальная частота вращения 18000 об/мин) в случае применения СЩ, выполненных на основе дисульфида молибдена с коллектором из профиля марки ПКМ показали, что снижение износов щёток за счёт установки СЩ наблюдалось только при работе двигателя на холостом ходу. При работе под нагрузкой износы не уменьшаются, а несколько увеличиваются. В таблице 5.1 представлены результаты по оценке влияния установки СЩ на характеристики коллекторного двигателя переменного тока мощностью 2,4 кВт, когда размеры токоведущих щеток были равны 8×16 мм, давление на токоведущие щётки 2,89 г/мм<sup>2</sup>, давление на СЩ с размерами 4×16 мм 0,5 г/мм<sup>2</sup> (давление на СЩ рассчитано по физической модели, приведённой в этой главе (п. 5.3)). Полученные отрицательные результаты можно объяснить тем, что при работе с номинальной нагрузкой в зоне контакта щётка-коллектор появляется

микротемпература больше 400°C, при которой дисульфид молибдена переходит в оксид (абразив), теряя свои смазочные свойства [94].

Таблица 5.1 - Рабочие характеристики МШУ-2,4-230М (коллектор из профиля марки ПКМ)

Параметры	Без смазывающей щётки		Установлена смазывающая щётка	
	Момент на валу $M_2$ , Н·м	0	30	0
Потребляемая мощность $P_1$ , Вт	1040	2350	1060	2320
Потребляемый ток $I$ , А	5,2	11,7	5,2	11,7
Частота вращения $n$ , об/мин	25170	19500	25570	19600
Степень искрения, балл	2	1 ½-2	1 ½-2	1 ½-2
Температура коллектора, °С	118	138	92	140

В работах Плохова И.В. [95] отмечается, что в контакте щётка-коллектор имеется несколько температурных узлов: узлы с металлической проводимостью ( $\alpha$ -узлы), узлы с плёночной проводимостью ( $\beta$ -узлы) и узлы, в которых контакт отсутствует. Программа «Contact», разработанная на кафедре ЭСА Псковского государственного политехнического института, позволяет рассчитать микротемпературы в выше перечисленных узлах, а также среднюю температуру контакта. По программе был проведен расчёт микротемператур в зоне контакта щётка-коллектор двигателя привода МШУ-2,4-230М, коллектор из профиля ПКМ, токоведущие щётки Г-33И.

Вид диалогового окна ввода данных показан на рис. 5.1.

Диалог создания модели

Название модели:

Щетка тангенц. размер, мм	<input type="text" value="8"/>	Сила нажатия, Н	<input type="text" value="6,23"/>
Щетка аксиальный размер, мм	<input type="text" value="16"/>	Ток, А	<input type="text" value="12,1"/>
Ширина ламели, мм	<input type="text" value="3,4"/>	Коэффициент трения	<input type="text" value="0,125"/>
Межламельное расстояние, мм	<input type="text" value="0,6"/>	Скорость, м/с	<input type="text" value="39,6"/>
Высота рельефа, мкм	<input type="text" value="4"/>	Температура ЩКА, °С	<input type="text" value="114"/>
Толщина пленки, мкм	<input type="text" value="0,5"/>	Температура воздуха, °С	<input type="text" value="20"/>
Высота узла, мкм	<input type="text" value="7"/>	Температура рекристаллизации, °С	<input type="text" value="350"/>
		Температура пробы, °С	<input type="text" value="150"/>
		Максимальная температура, °С	<input type="text" value="400"/>

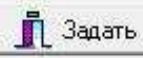
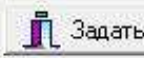
Материал щетки		Материал коллектора	
Жесткость, Па	<input type="text" value="2E7"/>	Жесткость, Па	<input type="text" value="2E7"/>
Удельное сопротивление, Ом*м	<input type="text" value="0,00024"/>	Удельное сопротивление, Ом*м	<input type="text" value="1,73E-8"/>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="1,7E3"/>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	<input type="text" value="8,93E3"/>
Теплопроводность, Вт/(м*К)	<input type="text" value="2"/>	Теплопроводность, Вт/(м*К)	<input type="text" value="390"/>
Теплоемкость, Дж/(кг*К)]	<input type="text" value="160"/>	Теплоемкость, Дж/(кг*К)]	<input type="text" value="380"/>
			

Рис. 5.1. Диалоговое окно ввода данных

Исходные данные для расчёта температур формируются на основании электромагнитного расчета, температуры коллектора, тепловых и физических характеристик материалов, а также рекомендаций разработчика.

Из расчета (таблица 5.2, 5.3) видно, что максимальная температура в зоне контакта при номинальном режиме и профиле коллектора марки ПКМ составляет 406,6 °С, на холостом ходу максимальная температура составила 147,48 °С. Следовательно, под действием высокой температуры в режиме номинальной нагрузки, которая превышает критическую температуру 400 °С, происходит переход дисульфида молибдена в оксид и потеря его смазывающих свойств.



В связи с этим были проведены исследования по влиянию марки материала коллектора на его температурный режим.

В испытуемые двигатели были поставлены якоря с коллекторами, изготовленными из профиля марки ПКМС (профиль коллекторный из меди, легированной серебром), обеспечивающие меньший коэффициент трения.

В таблице 5.4 представлены рабочие характеристики двигателя с коллектором, выполненным из профиля марки ПКМС без СЩ и при их установке с удельным давлением на токоведущие  $3,28 \text{ г/мм}^2$ . Как следует из табличных данных, применение СЩ при использовании профиля марки ПКМС, обеспечивает снижение средней температуры коллектора как при холостом ходе, так и под нагрузкой.

Таблица 5.2 - Данные расчёта на холостом ходу (профиль ПКМ)

Контакт	
Шаг мех	801
А-узлов	5
Б-узлов	50
Кластеров	3
R контакта, Ом	1,2386
R расчетное, Ом	79,2721
G контакта, 1/Ом	0,81
G расчетная, 1/Ом	0,013
U, В	3,716
I контакта, А	3,00
I расчетный, А	0,047
J, А/см <sup>2</sup>	2,34
Rэл контакта, Вт	11,15
Rэл расчетная, Вт	0,1742
Rмех контакта, Вт	84,11
Rмех АБ-узла, Вт	0,0239
DTмех, °С	2,0354
Dтемп, сек	6,1E-8
Dтмех, сек	1,9E-7
Tср контакта, °С	100,20
Tср А-узлов, °С	134,72
Tмакс, °С	147,48

Таблица 5.3 - Данные расчёта при номинальном режиме (профиль ПКМ)

Контакт	
Шаг мех	801
А-узлов	16
Б-узлов	24
Кластеров	5
R контакта, Ом	0,6924
R расчетное, Ом	44,3145
G контакта, 1/Ом	1,44
G расчетная, 1/Ом	0,023
U, В	8,378
I контакта, А	12,10
I расчетный, А	0,189
J, А/см <sup>2</sup>	9,45
Rэл контакта, Вт	101,38
Rэл расчетная, Вт	1,5840
Rмех контакта, Вт	61,68
Rмех АБ-узла, Вт	0,0241
DTмех, °С	2,0524
Dтемп, сек	6,1E-8
Dтмех, сек	2,5E-7
Tср контакта, °С	101,38
Tср А-узлов, °С	309,85
Tмакс, °С	406,60

Таблица 5.4 - Рабочие характеристики МШУ-2,4-230М (коллектор из профиля марки ПКМС)

Параметры	Без смазывающей щётки		Установлена смазывающая щётка	
	Момент на валу $M_2$ , Н·м	0	30	0
Потребляемая мощность $P_1$ , Вт	1050	2320	1070	2300
Потребляемый ток $I$ , А	5	10,6	5,2	11,6
Частота вращения $n$ , об/мин	25540	19790	25710	19640
Степень искрения, балл	1 ½	2	2	1 ½
Температура коллектора, °С	112	122	84	107

По программе «Contact» вновь был проведен расчёт микротемператур в зоне контакта щётка-коллектор. Для коллектора из профиля марки ПКМС максимальная температура в зоне контакта на холостом ходу 134,5 °С, при номинальном режиме 246,62 °С. Критическая температура для ДМ 400°С не превышает, что обеспечивает хорошие смазывающие свойства щёток, изготовленных из дисульфида молибдена (таблица 5.5, 5.6).

Появление эффекта снижения температуры коллектора при установке СЩ подтверждает высказанное ранее предположение о наличии в случае использования профиля марки ПКМ при холостом ходе микротемператур, превышающих 400°С, вызывающих появление оксида на коллекторе (определяющей является максимальная температура точек контакта, а не средняя температура  $\alpha$ -узлов, на которую нужно ориентироваться в случае проектирования коллекторных машин постоянного и переменного тока, оборудованных СЩ).

В дальнейшем была проведена оценка возможности увеличения ресурса щёток за счёт применения СЩ в сочетании с разными марками токоведущих щёток на коллекторе, выполненном из профиля марки ПКМС [Приложение VII].

В таблице 5.7 представлены результаты оценки износов щёток Г-33И, Г-33МИ, ЭГ-84УМК и ЭГ-61А в случае использования СЦ (высота щёток до испытаний 27 мм, минимально допустимая высота – 14 мм).

Как следует из приведённых данных применение СЦ позволяет увеличить ресурс щёток Г-33И при номинальной мощности в 2,2 раза, Г-33МИ в 1,7 раза. Применение щёток ЭГ-61А и ЭГ-84УМК в сочетании со СЦ увеличило ресурс относительно базовой щётки Г-33И (при наличии СЦ) в 2,3 раза и в 2,1 раза соответственно. Применение щётки ЭГ-84УМК с размером 6,3x16 мм в сочетании со СЦ позволило увеличить ресурс по отношению к базовой щётке Г-33И без СЦ больше, чем в 4 раза. Результаты подтверждены актом промышленных испытаний [приложение VII].

Таблица 5.5 - Данные расчёта на холостом ходу (профиль ПКМС)

Контакт	
Шаг, мех	801
А-узлов	16
Б-узлов	193
Кластеров	10
R контакта, Ом	0,6924
R расчетное, Ом	44,3144
G контакта, 1/Ом	1,44
G расчетная, 1/Ом	0,023
U, В	2,077
I контакта, А	3,00
I расчетный, А	0,047
J, А/см <sup>2</sup>	2,34
Pэл контакта, Вт	6,23
Pэл расчетная, Вт	0,0974
Pмех контакта, Вт	42,05
Pмех АБ-узла, Вт	0,0031
DTмех, °С	0,3881
Dtemp, сек	6,4E-8
Dtmех, сек	1,9E-7
Tср контакта, °С	100,20
Tср А-узлов, °С	128,76
Tмакс, °С	134,50

Таблица 5.6 - Данные расчёта при номинальном режиме (профиль ПКМС)

Контакт	
Шаг, мех	801
А-узлов	31
Б-узлов	186
Кластеров	7
R контакта, Ом	0,4775
R расчетное, Ом	30,5630
G контакта, 1/Ом	2,09
G расчетная, 1/Ом	0,033
U, В	5,778
I контакта, А	12,10
I расчетный, А	0,189
J, А/см <sup>2</sup>	9,45
Pэл контакта, Вт	69,92
Pэл расчетная, Вт	1,0925
Pмех контакта, Вт	30,84
Pмех АБ-узла, Вт	0,0022
DTмех, °С	0,1958
Dtemp, сек	6,4E-8
Dtmех, сек	2,5E-7
Tср контакта, °С	100,62
Tср А-узлов, °С	210,84
Tмакс, °С	246,62

В результате проведённых исследований можно сделать заключение о существенном влиянии в двигателях переменного тока материала коллектора на эффективность СЩ за счёт снижения микротемператур, возникающих в зоне контакта щётка-коллектор, обусловленных уменьшением коэффициента трения. Применение профиля марки ПКМС позволяет расширить диапазон использования СЩ за счёт пониженного коэффициента трения щётка - коллектор. Применение щётки ЭГ-84УМК с размером 6,3x16мм в сочетании со СЩ позволило увеличить ресурс по отношению к базовой щётке головного образца серии Г-33И без СЩ в 4 раза. В соответствии с обсуждением результатов работы на техсовете АО «Лепсе» принято решение об изготовлении четырёх модернизированных двигателей МШУ по промышленной технологии, оборудованных СЩ, для длительных ресурсных испытаний и решения вопроса о внедрении СЩ в серийное производство (приложение VII).

Таблица 5.7 - Износ щёток МШУ-2,4-230М (коллектор из профиля марки ПКМС)

№	Расчётный ресурс до предельно допустимого износа щёток, час			Эффективность относительно базовой щётки Г-33И, раз		Потребляемая мощность, кВт	Условия опыта
	1 щётка	2 щётка	СЩ	1 щётка	2 щётка		
1.	63	60	-	-	-	1,5	Щётки Г-33И.
2.	46	45	-	-	-	2,4	
3.	70	74	350	1.1	1.2	1,5	Щётки Г-33И.
4.	48	54	1167	1.0	1.2	2,4	Установлена смазывающая щётка
5.	201	302	280	3.2	5.0	1,5	Щётки ЭГ-61А.
6.	200	221	700	4.3	4.9	2,4	Установлена смазывающая щётка
7.	78	88	-	1.2	1.5	1,5	Щётки Г-33МИ.
8.	75	70	-	1.6	1.6	2,4	
9.	140	117	1400	2.2	2.0	1,5	Щётки Г-33МИ.
10.	127	127	1400	2.8	2.8	2,4	Установлена смазывающая щётка
11.	140	127	467	2.2	2.1	1,5	Щётки Г-33МИ.
12.	117	117	700	2.5	2.6	2,4	Установлена смазывающая щётка
13.	200	200	233	3.2	3.3	1,5	Щётки ЭГ-84УМК.
14.	182	156	200	4.0	3.5	2,4	Установлена смазывающая щётка

## 5.2 Расчёт влияния отклонений параметров щёточно-коллекторного узла на температуру в зоне контакта щётка-коллектор

В дальнейшем были проведены исследования по оценке влияния отклонений параметров щёточно-коллекторного узла, влияющих на среднюю температуру альфа узлов и максимальную температуру в зоне контакта (таблицы 5.8 – 5.21).

Из программы расчёта (рис. 5.1) были выбраны те параметры, которые относятся непосредственно к материалу щетки и коллектора и характеру контакта (высота рельефа, толщина пленки, высота узла, жесткость щетки, уд. сопротивление щетки, плотность щетки, теплопроводность щетки, теплоемкость щетки, жесткость коллектора, удельное сопротивление коллектора, плотность коллектора, теплопроводность коллектора, теплоемкость коллектора, температура рекристаллизации). Изменение проводилось в сторону увеличения и уменьшения одного параметра на 30% при неизменных других, соответствующих режиму номинальной нагрузки с коллекторами, выполненными из профиля ПКМ и ПКМС. Для большей достоверности каждый расчет повторялся несколько раз, и фиксировалось среднее арифметическое значение температур. Во всех таблицах температуры записаны в таком порядке:  $t_1$  - средняя температура коллектора;  $t_2$  - средняя температура  $\alpha$ -узла;  $t_3$  - максимальная температура контакта.

Таблица 5.8 - Влияние на температуры высоты рельефа

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
-30%	101,36	285,16	386,2	100,93	153,45	176,24
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,31	377,78	474,64	100,73	282,92	365,46

Таблица 5.9 - Влияние на температуры толщины политурной пленки

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,57	335,5	458,65	100,88	238,33	300,26
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,03	260,97	345,14	100,82	168,41	194,88

Таблица 5.10 - Влияние на температуры высоты узла

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,78	321,75	466,41	100,95	217,25	288,5
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101	219,36	325,71	100,7	165,65	202,26

Таблица 5.11 - Влияние на температуры жесткости токоведущей щетки

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,02	193,67	230,33	100,75	181,77	218,61
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,59	350,68	462,47	100,77	193,55	247,86

Таблица 5.12 - Влияние на температуры удельного сопротивления токоведущей щетки

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	100,78	226,5	272,49	100,54	181,18	207,84
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,33	335,23	462,14	100,95	238,15	307,61

Таблица 5.13 - Влияние на температуры плотности токоведущей щетки

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,11	211,42	274,84	101,07	202,4	247,32
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	100,67	371,99	447,25	100,81	220,53	281,32

Таблица 5.14 - Влияние на температуры теплопроводности токоведущей щетки

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,05	201,42	257,29	100,6	175,18	209,02
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,8	335,23	438,44	100,77	264,45	315,9

Таблица 5.15 - Влияние на температуры теплоемкости токоведущей щетки

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,44	355,73	496,14	100,94	210,62	260,8
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101	194,02	233,81	100,61	171,87	200,47

Таблица 5.16 - Влияние на температуры жесткости материала коллектора

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,31	197,35	235,06	100,57	171,77	199,9
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,56	323,3	432,77	100,72	244,96	266,96

Таблица 5.17 - Влияние на температуры удельного сопротивления материала коллектора

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,06	232,5	304,1	100,56	198,04	245,47
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,47	306,33	425,08	100,73	230,7	273,13

Таблица 5.18 - Влияние на температуры плотности материала коллектора

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,46	336,69	501,12	100,81	293,1	353,5
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,12	280,17	384,17	100,63	194,75	235,55

Таблица 5.19 - Влияние на температуры теплопроводности материала коллектора

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,87	377,39	472,34	100,87	237,48	316,07
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,81	275,81	356,53	100,6	173,64	193,47

Таблица 5.20 - Влияние на температуры теплоемкости материала коллектора

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,48	328,11	459,39	100,64	214,89	266,06
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,17	195,8	237,08	100,85	224,64	276,61

Таблица 5.21 - Влияние на температуры температуры рекристаллизации

Изменение параметра	Материал профиля коллектора					
	ПКМ			ПКМС		
	Температура, °С					
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
-30%	101,1	206,13	241,76	100,59	198,61	233,14
0	101,38	309,85	406,6	100,62	210,84	246,62
+30%	101,39	334,8	445,48	100,78	235,47	302,82

Влияние каждого фактора в процентном соотношении к штатному режиму сведены в таблицу 5.22. Все величины указаны в процентах.



Таблица 5.22 - Оценка влияния различных факторов на максимальную температуру

Параметр	Материал профиля коллектора			
	ПКМ		ПКМС	
	Отклонение от штатного режима, %			
	-30%	+30%	-30%	+30%
Высота рельефа	-5	+16,7	-28,5	+48,2
Толщина пленки	+12,8	-15,1	+21,8	-21
Высота узла	+14,7	-19,9	+17	-18
Жесткость щетки	-43,4	+13,7	-11,4	+0,5
Уд. сопротивление щетки	-33	+13,7	-15,7	+24,7
Плотность щетки	-32,4	+10	+0,3	+14,1
Теплопроводность щетки	-36,7	+7,8	-15,2	+28,1
Теплоемкость щетки	+22	-42,5	+5,7	-18,7
Жесткость коллектора	-42,2	+6,4	-18,9	+8,2
Уд. сопротивление коллектора	-25,2	+4,5	-0,5	+10,7
Плотность коллектора	+23,2	-5,5	+43,3	-4,5
Теплопроводность коллектора	+16,2	-12,3	+28,2	-21,6
Теплоемкость коллектора	+13	-41,7	+7,9	+12,2
Температура рекристаллизации	-40,5	+9,6	-5,5	+22,8

Как следует из приведённых данных, на температуру в зоне контакта щетка - коллектор из профиля марки ПКМ в номинальном режиме активнее всего влияют: жесткость токоведущей щетки (при уменьшении параметра на 30% температура снижается на 43,4%), жесткость материала коллектора (при уменьшении параметра на 30% температура снижается на 42,2%) и температура рекристаллизации (при уменьшении параметра на 30% температура снижается на 40,5%).

При коллекторе из профиля марки ПКМС на температуру в зоне контакта щетка - коллектор в номинальном режиме активнее всего влияют высота рельефа (при увеличении параметра на 30% температура повышается на 48,2%) и плотность материала коллектора (при уменьшении параметра на 30% температура повышается на 43,4%).

### 5.3 Модели износа коллектора и токоведущих щёток при установке смазывающих щёток

Как следует из п. 5.2, применение СЩ, выполненных на основе дисульфида молибдена позволяет значительно снизить износ токоведущих щёток за счёт снижения коэффициента трения щётка-коллектор, который влияет не только на износ щёток, но и на износ самого коллектора. В связи с этим, по заказу АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе» (паспортная работа МКВИ.11-625) нами были проведены исследования для создания физических моделей по влиянию установки СЩ на износ токоведущих щёток и коллектора (двигатель привода МШУ-2,4-230М, токоведущие щётки Г-33И).

Величина потребляемого тока устанавливалась на уровне 0,8 номинального значения. Исследования проводились в стационарном режиме: 10 часов непрерывной работы с нагрузкой, обеспечивающей необходимый потребляемый ток, частота вращения варьировалась изменением величины питающего напряжения, охлаждение осуществлялось путём принудительного продува зоны контакта щётка - коллектор.

Для определения влияния подачи смазки в зону контакта на износ токоведущих щёток Г-33И (профиль марки ПКМС) создана модель износов токоведущих щёток при установке СЩ. В качестве варьируемых параметров были выбраны: частота вращения двигателя  $n$ , удельное давление на СЩ  $q_{сщ}$ , удельное давление на токоведущие щётки  $q_{щ}$  (табл. 5.23). Замер высоты щёток проводился электронным штангенциркулем (цена деления 0,01 мм). В результате была получена матрица износов (табл. 5.24).

Таблица 5.23 - Значения давлений на щётки при размере смазывающей щётки 4x16 мм и размере токоведущей щётки 8x16 мм

Давление на СЩ, г	Удельное давление на СЩ, г/мм <sup>2</sup>	Давление на токоведущую щётку, г	Удельное давление на токоведущую щётку, г/мм <sup>2</sup>
65	1,01	370	2,89
80	1,25	420	3,28
50	0,78	320	2,5

Таблица 5.24 - Матрица данных износов токоведущих щёток при установке смазывающей щётки (профиль коллектора марки ПКМС)

Переменные параметры	Код	n, об/мин	q <sub>ещ</sub> , г/мм <sup>2</sup>	q <sub>эщ</sub> , г/мм <sup>2</sup>	x <sub>4</sub> =x <sub>12</sub> =x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>5</sub> =x <sub>13</sub> =x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>6</sub> =x <sub>23</sub> =x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>0</sub>	Функция цели			
									Износ токоведущих щёток (среднее экспериментальное значение)	Износ токоведущих щёток (расчётное по полиному)		
Базовый уровень	0	11254	1,01	2,89								
Верхний уровень	+	13284	1,25	3,28								
Нижний уровень	-	9225	0,78	2,5								
Условное обозначение		x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>0</sub>	h <sub>э</sub> , мм/1000 час	h, мм/1000 час		
Результаты рандомизации эксперимента	8	Планируемый эксперимент	1	-	-	-	+	+	+	+	36	37,8
	4		2	+	-	-	-	-	+	+	58	56,3
	1		3	-	+	-	-	+	-	+	55	53,3
	6		4	+	+	-	+	-	-	+	60	61,8
	5		5	-	-	+	+	-	-	+	43	41,3
	2		6	+	-	+	-	+	-	+	69	70,8
	7		7	-	+	+	-	-	+	+	38	39,8
	3		8	+	+	+	+	+	+	+	61	59,3

Полином износов имеет вид:

$$h=52,8+9,5 \cdot X_1+1 \cdot X_2+0,25 \cdot X_3-2,5 \cdot X_4+2,75 \cdot X_5-4,25 \cdot X_6, \quad (7)$$

где  $X_1$  – коэффициент, определяемый частотой вращения;

$X_2$  – коэффициент, определяемый давлением на СЩ;

$X_3$  – коэффициент, определяемый давлением на токоведущую щётку;

$X_4$ - коэффициент, учитывающий взаимное влияние частоты вращения и давления на СЩ;

$X_5$  - коэффициент, учитывающий взаимное влияние частоты вращения и давления на токоведущие щётки;

$X_6$  - коэффициент, учитывающий взаимное влияние давления на СЩ и давления на токоведущие щётки.

Принимается, что влияние случайных факторов во всех точках факторного пространства одинаково, т.е. пространство однородно. Поэтому было проведено 3 дублирующих опыта (m) для первой строки матрицы планирования.

Дисперсия воспроизводимости опыта для проверки нуль-гипотезы:

$$s_1^2 b = \frac{1}{m-1} \left[ b_1 - b_{cp}^2 + b_2 - b_{cp}^2 + b_3 - b_{cp}^2 \right], \quad (8)$$

$$s_1^2 h = 4.$$

Дисперсия для всех коэффициентов:

$$s_1^2 b_i = \frac{s_1^2 b}{N \cdot m},$$

$$s_1^2 b_i = 0,17.$$

Проверка значимости коэффициентов полинома с помощью критерия Стьюдента.

$$t_i = \frac{|b_i|}{s b_i}, \quad (9)$$

где  $b_i$ - любой коэффициент полинома;

$s b_i$  - математическое отклонение величины  $b_i$ .

$$t_1=23,3; t_2=2,45; t_3=0,61; t_{13}=6,74; t_{23}=-10,4; t_{12}=-6,12.$$

Уровень значимости, характеризующий возможность принятия неправильного решения, принимается  $q=5\%$ . Число степеней свободы, характеризующее объём экспериментальной выборки  $\nu_{зн}=N(m-1)=16$ . При расчёте  $\nu_{зн}$  принимается  $m=3$ , так как было проведено дублирование для первой строчки матрицы планирования и выдвинуто предположение об однородности дисперсии факторного пространства в других экспериментальных точках. Для  $q=5\%$  и  $\nu_{зн}=16$  значение  $t$ -критерия Стьюдента  $t_{кр}=2,12$ . Величина  $t_i$ , вычисленная для каждого коэффициента полинома, сравнивается с величиной  $t_{кр}$ . Так как  $t_3 < t_{кр}$ , коэффициент  $b_3$  незначим, т.е. может быть опущен в полиноме.

После проверки значимости коэффициентов полином имеет следующий вид:

$$h=52,8+9,5 \cdot X_1+1 \cdot X_2-2,5 \cdot X_4+2,75 \cdot X_5-4,25 \cdot X_6, \quad (10)$$

Значения функции цели, полученные расчётным путём по полиному, записаны в последнем столбце табл. 5.24. Величины износов, рассчитанных по

представленным полиномам, отличаются от данных, полученных из опытов, менее чем на 10% во всей области варьирования

Проверка адекватности проводится с помощью статистического F-критерия.

$$F = \frac{s_{a0}^2}{s^2_y}, \quad (11)$$

где  $s_{a0}^2$  - дисперсия неадекватности;

$$s_{a0}^2 = 12; F=3,06.$$

Вычисленная величина F сравнивается с  $F_{кр}$ , которая выбирается с учётом уровня значимости ( $q=5\%$ ), числа степеней свободы ( $v_{зн}=16$ ) и числа степеней свободы аппроксимирующего полинома ( $v_1=N-d=2$ ).

$$F_{кр}=3,6.$$

Так как  $F < F_{кр}$ , следовательно полином адекватен.

Среди варьируемых факторов наибольшую весомость в модели износа токоведущих щёток имеет частота вращения.

С помощью полученного полинома определяется оптимальное давление на СЩ, при котором будет наименьший износ токоведущих щёток. Задача решается за счёт изменения величины  $q_{сщ}$ , а величины  $N$  и  $q_{эщ}$  остаются без изменения, т.е. на базовом уровне, где  $x_1=0$  и  $x_3=0$ . Тогда полином будет иметь вид  $h=52,5+x_2$ . Для  $h=36$   $x_2=-16,5$  значение удельного давления на СЩ в абсолютных единицах,  $г/мм^2$ , будет

$$q_{сщ} = x_2 \cdot q_{сщ\ ср} - q_{сщ\ min} + q_{сщ\ ср}, \quad (12)$$

где  $q_{сщ\ ср}$  – базовое значение давления на СЩ в натуральных единицах;

$q_{сщ\ min}$  – минимальное значение давления на СЩ в натуральных единицах;

$$q_{сщ} = -16,5 \cdot 1,01 - 0,78 + 1,01 = 2,7.$$

При размерах СЩ 4x16мм, давление на СЩ, соответствующее минимальному износу токоведущих щёток, равно 172 г.

В дальнейшем были проведены эксперименты на МШУ-2,4-230М с коллектором, выполненном из профиля марки ПКМС, и создана математическая модель износа коллектора. Замер диаметра коллектора проводился электронным штангенциркулем (цена деления 0,01 мм) по рабочей и нерабочей дорожкам по пяти точкам на диаметр.

В таблице 5.25 матрица износов при варьировании частоты вращения якоря, ширины токоведущих щёток и удельного давления на токоведущие щётки.

Таблица 5.25 - Матрица данных износов коллектора (марка профиля ПКМС)

Переменные параметры		Код	n, об/мин	V <sub>тш</sub> , мм	Q <sub>эш</sub> , Г/мм <sup>2</sup>	X <sub>4</sub> =X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>5</sub> =X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>6</sub> =X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>0</sub>	Функция цели		
										Износ коллектора (среднее экспериментальное значение)	Износ коллектора (расчётное по полиному)	
Базовый уровень		0	11254	7,15	2,89							
Верхний уровень		+	13284	8	3,28							
Нижний уровень		-	9225	6,3	2,5							
Условное обозначение			x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>0</sub>	h <sub>э</sub> , мкм	h, мкм	
Результаты рандомизации эксперимента	8	Планируемый эксперимент	1	-	-	-	+	+	+	+	90	88,8
	4		2	+	-	-	-	-	+	+	95	95
	1		3	-	+	-	-	+	-	+	95	96,3
	6		4	+	+	-	+	-	-	+	115	115
	5		5	-	-	+	+	-	-	+	100	101,3
	2		6	+	-	+	-	+	-	+	130	130
	7		7	-	+	+	-	-	+	+	110	108,8
	3		8	+	+	+	+	+	+	+	150	150

Полином износов имеет вид:

$$h=110,6+11,9 \cdot X_1+6,88 \cdot X_2+11,88 \cdot X_3+3,13 \cdot X_4+5,63 \cdot X_5+0,63 \cdot X_6,$$

где X<sub>1</sub> – коэффициент, определяемый частотой вращения;

X<sub>2</sub> – коэффициент, определяемый шириной токоведущих щёток;

X<sub>3</sub> – коэффициент, определяемый давлением на токоведущую щётку;

X<sub>4</sub>- коэффициент, учитывающий взаимное влияние частоты вращения и ширины токоведущих щёток;

X<sub>5</sub> - коэффициент, учитывающий взаимное влияние частоты вращения и давления на токоведущие щётки;

$X_6$  - коэффициент, учитывающий взаимное влияние ширины токоведущих щёток и давления на токоведущие щётки.

Принимается, что влияние случайных факторов во всех точках факторного пространства одинаково, т.е. пространство однородно. Поэтому было проведено 3 дублирующих опыта ( $m$ ) для первой строки матрицы планирования.

Дисперсия воспроизводимости опыта для проверки нуль-гипотезы:

$$s_1^2 h = 22,6.$$

Дисперсия для всех коэффициентов:

$$s_1^2 b_i = 0,94.$$

Проверка значимости коэффициентов полинома с помощью критерия Стьюдента.

$$t_1=12,2; t_2=7,1; t_3=12,2; t_{13}=5,8; t_{23}=3,2; t_{12}=0,64.$$

Для  $q=5\%$  и  $v_{зн}=16$  значение t-критерия Стьюдента  $t_{кр}=2,12$ .

Так как  $t_{23}<t_{кр}$ , коэффициент  $b_{23}$  незначим, т.е. может быть опущен в полиноме.

После проверки значимости коэффициентов полином имеет следующий вид:

$$h=110,6+11,9 \cdot X_1+6,88 \cdot X_2+11,88 \cdot X_3+3,13 \cdot X_4+5,63 \cdot X_5.$$

Значения функции цели, полученные расчётным путём по полиному, записаны в последнем столбце табл. 5.25. Величины износов, рассчитанных по представленным полиномам, отличаются от данных, полученных из опытов, менее чем на 10% во всей области варьирования

Дисперсия неадекватности  $s_{ao}^2 = 3,13$ . Статистический F-критерий  $F=0,14$ .

Вычисленная величина F сравнивается с  $F_{кр}$ , которая выбирается с учётом уровня значимости ( $q=5\%$ ), числа степеней свободы ( $v_{зн}=16$ ) и числа степеней свободы аппроксимирующего полинома ( $v_1=N-d=2$ ).

$$F_{кр}=3,6.$$

Так как  $F<F_{кр}$ , следовательно полином адекватен.

Среди варьируемых факторов наибольшую весомость в модели износа коллектора имеют частота вращения и давление на токоведущую щётку.

С помощью полученного полинома определяется оптимальное давление на токоведущие щётки, при котором будет наименьший износ коллектора. Задача решается за счёт изменения величины  $q_{эщ}$ , а величины  $N$  и  $v_{эщ}$  остаются без изменения, т.е. на базовом уровне, где  $x_1=0$  и  $x_2=0$ . Тогда полином будет иметь вид  $h=110,6+11,9 \cdot x_2$ . Для  $h=90$   $x_2=-1,7$  значение удельного давления на токоведущие щётки в абсолютных единицах,  $г/мм^2$ , будет  $q_{сц} = 2,23$ . При размерах токоведущих щёток  $8 \times 16$  мм, давление, соответствующее минимальному износу коллектора, равно 285 г.

В дальнейшем была создана физическая модель на базе двигателя привода МШУ-2,4-230М, когда использовалась СЩ, для определения влияния удельного давления на СЩ на износ коллектора (профиль марки ПКМС) и поиска его оптимального значения. По рекомендации заказчика в качестве варьируемых параметров были выбраны: частота вращения двигателя  $n$ , удельное давление на токоведущие щётки  $q_{эщ}$ , удельное давление на СЩ  $q_{сц}$ .

Величина потребляемого тока по рекомендации заказчика устанавливалась на уровне 0,8 номинального значения. Исследования проводились в стационарном режиме: 10 часов непрерывной работы с нагрузкой, обеспечивающей необходимый потребляемый ток, частота вращения варьировалась изменением величины питающего напряжения, охлаждение осуществлялось путём принудительного продува зоны контакта щётка - коллектор.

В результате была получена матрица износов при варьировании частоты вращения якоря, удельного давления на СЩ и удельного давления на токоведущие щётки (табл. 5.26). По методике [18, 73] был составлен полином величины износа коллектора.



Таблица 5.26 - Матрица данных износов коллектора при установке смазывающей щётки (профиль марки ПКМС)

Переменные параметры		Код	n, об/мин	q <sub>сш</sub> , г/мм <sup>2</sup>	q <sub>эш</sub> , г/мм <sup>2</sup>	x <sub>4</sub> =x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>5</sub> =x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>6</sub> =x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>0</sub>	Функция цели		
Базовый уровень		0	11254	1,01	2,89					Износ коллектора (среднее экспериментальное значение)	Износ коллектора (расчётное по полиному)	
Верхний уровень		+	13284	1,25	3,28							
Нижний уровень		-	9225	0,78	2,5							
Условное обозначение			x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>0</sub>	h <sub>э</sub> , мкм	h, мкм	
Результаты рандомизации эксперимента	8	Планируемый эксперимент	1	-	-	-	+	+	+	+	45	45.0
	4		2	+	-	-	-	-	+	+	50	46.3
	1		3	-	+	-	-	+	-	+	40	40.0
	6		4	+	+	-	+	-	-	+	60	63.8
	5		5	-	-	+	+	-	-	+	55	55.0
	2		6	+	-	+	-	+	-	+	65	68.8
	7		7	-	+	+	-	-	+	+	50	50.0
	3		8	+	+	+	+	+	+	+	90	86.3

Полином износов имеет вид:

$$h=56,88+9,375 \cdot X_1+3,125 \cdot X_2+8,125 \cdot X_3+5,625 \cdot X_4+3,125 \cdot X_5+1,875 \cdot X_6, \quad (13)$$

где X<sub>1</sub> – коэффициент, определяемый частотой вращения;

X<sub>2</sub> – коэффициент, определяемый давлением на СЩ;

X<sub>3</sub> – коэффициент, определяемый давлением на токоведущую щётку;

X<sub>4</sub> – коэффициент, учитывающий взаимное влияние частоты вращения и давления на СЩ;

X<sub>5</sub> – коэффициент, учитывающий взаимное влияние частоты вращения и давления на токоведущие щётки;

X<sub>6</sub> – коэффициент, учитывающий взаимное влияние давления на СЩ и давления на токоведущие щётки.

Принимается, что влияние случайных факторов во всех точках факторного пространства одинаково, т.е. пространство однородно. Поэтому было проведено 3 дублирующих опыта (m) для первой строки матрицы планирования.

Дисперсия воспроизводимости опыта для проверки нуль-гипотезы:

$$s_1^2 b = \frac{1}{m-1} \left[ b_1 - b_{cp}^2 + b_2 - b_{cp}^2 + b_3 - b_{cp}^2 \right], \quad (14)$$

$$s_1^2 h = 317.$$

Дисперсия для всех коэффициентов:

$$s_1^2 b_i = \frac{s_1^2 b}{N \cdot m},$$

$$s_1^2 b_i = 1.04.$$

Проверка значимости коэффициентов полинома с помощью критерия Стьюдента.

$$t_i = \frac{|b_i|}{s b_i}, \quad (15)$$

где  $b_i$ - любой коэффициент полинома;

$s b_i$  - математическое отклонение величины  $b_i$ .

$$t_1=9,18; t_2=3,06; t_3=7,96; t_{13}=3,06; t_{23}=1,83; t_{12}=5,51.$$

Уровень значимости, характеризующий возможность принятия неправильного решения, принимается  $q=5\%$ . Число степеней свободы, характеризующее объём экспериментальной выборки  $v_{зн}=N(m-1)=16$ . При расчёте  $v_{зн}$  принимается  $m=3$ , так как было проведено дублирование для первой строчки матрицы планирования и выдвинуто предположение об однородности дисперсии факторного пространства в других экспериментальных точках. Для  $q=5\%$  и  $v_{зн}=16$  значение t-критерия Стьюдента  $t_{кр}=2,12$ . Величина  $t_i$ , вычисленная для каждого коэффициента полинома, сравнивается с величиной  $t_{кр}$ .

Так как  $t_{23} < t_{кр}$ , коэффициент  $b_{23}$  незначим, т.е. может быть опущен в полиноме.

После проверки значимости коэффициентов полином имеет следующий вид:

$$h=56,88+9,375 \cdot x_1+3,125 \cdot x_2+8,125 \cdot x_3+5,625 \cdot x_4+3,125 \cdot x_5. \quad (16)$$

Значения функции цели, полученные расчётным путём по полиному, записаны в последнем столбце табл. 5.26. Величины износов, рассчитанных по

представленным полиномам, отличаются от данных, полученных из опытов, менее чем на 10% во всей области варьирования

Проверка адекватности проводится с помощью статистического F-критерия.

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s^2_y}, \quad (17)$$

где  $s_{ad}^2$  - дисперсия неадекватности;

$$s_{ad}^2 = 14,06; F=0,562.$$

Вычисленная величина F сравнивается с  $F_{кр}$ , которая выбирается с учётом уровня значимости ( $q=5\%$ ), числа степеней свободы ( $v_{зн}=16$ ) и числа степеней свободы аппроксимирующего полинома ( $v_1=N-d=2$ ).

$$F_{кр}=3,6.$$

Так как  $F < F_{кр}$ , следовательно полином адекватен.

Среди варьируемых факторов наибольшую весомость в модели износа коллектора имеют частота вращения и давление на токоведущую щётку. Коэффициенты полинома, учитывающие взаимное сочетание параметров также влияют на значение износа, особенно коэффициент  $x_4$ , учитывающий частоту вращения и давление на щётки.

С помощью полученного полинома определяется оптимальное давление на СЩ, при котором будет наименьший износ коллектора. Задача решается за счёт изменения величины  $q_{сщ}$ , а величины  $N$  и  $q_{эщ}$  остаются без изменения, т.е. на базовом уровне, где  $x_1=0$  и  $x_3=0$ . Тогда полином будет иметь вид  $h=56,88+3,125 \cdot x_2$ . Для  $h=54$   $x_2=-0,92$  значение удельного давления на СЩ в абсолютных единицах, г/мм<sup>2</sup>, будет

$$q_{сщ} = x_2 \cdot q_{сщ\text{ ср}} - q_{сщ\text{ min}} + q_{сщ\text{ ср}}, \quad (18)$$

где  $q_{сщ\text{ ср}}$  – базовое значение давления на СЩ в натуральных единицах;

$q_{сщ \min}$  – минимальное значение давления на СЩ в натуральных единицах;

$$q_{сщ} = -0,92 \cdot 1,01 - 0,78 + 1,01 = 0,8.$$

При размерах СЩ 4x16мм, давление на СЩ, соответствующее минимальному износу коллектора, равно 51г.

В соответствии с полученными результатами были проведены ресурсные испытания двигателя МШУ-2,4-230М с коллектором, выполненным из профиля марки ПКМС с оптимальным давлением на СЩ (толщина СЩ равна половине толщины токоведущей) в результате которых износ коллектора в случае установки СЩ уменьшился в 2 раза, получен акт испытаний [приложение VIII].

## Выводы по главе 5

1. Проведена оценка влияния материала коллектора (профиль марки ПКМ (профиль коллекторный медный) и ПКМС (профиль коллекторный медный легированный серебром)) на эффективность применения СЩ, с расчётом микротемператур в зоне контакта щётка-коллектор. Профиль марки ПКМС за счёт меньшего коэффициента трения щётка-коллектор снижает микротемпературы в зоне контакта щётка - коллектор и расширяет диапазон применения СЩ.

2. Значение максимальной температуры среди узлов контактного слоя определяет возможность применения СЩ.

3. Проведена оценка влияния элементов щёточно-коллекторного узла на микротемпературу альфа-узлов и максимальную температуру среди узлов контактного слоя в зоне контакта щётка – коллектор. У коллектора, выполненного из профиля марки ПКМ на температуры наибольшее влияние оказывают жесткость токоведущей щетки, жесткость материала коллектора и температура рекристаллизации. У коллектора из профиля марки ПКМС - высота рельефа, толщина ПП и плотность материала коллектора.

4. Составлена физическая модель износа токоведущих щёток Г-33И при установке СЩ на коллекторе, выполненном из профиля марки ПКМС при варьировании частотой вращения, удельным давлением на смазывающую и токоведущие щётки.

5. Составлены физическая модель износа коллектора из профиля марки ПКМС при варьировании частотой вращения, шириной токоведущей щётки и удельного давления на токоведущие щётки

6. Составлены физическая модель износа коллектора из профиля марки ПКМС при установке СЩ с варьированием частотой вращения, удельным давлением на смазывающую и токоведущие щётки.

7. Для вновь спроектированного двигателя привода МШУ-2,4-230М в соответствии с разработанной физической моделью определено оптимальное давление на токоведущие и СЩ, при котором износ коллектора минимальный.

8. Результаты расчёта износа коллектора в случае применения СЦ, полученные по модели, подтверждены ресурсными испытаниями [приложение VIII]. Установка СЦ на двигателе привода МШУ-2,4-230М с токоведущими щётками Г-33И при оптимальном давлении на смазывающую щётку по результатам ресурсных испытаний позволило уменьшить износ коллектора в 2 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрены способы снижения износа токоведущих щёток в коллекторных электрических постоянного тока, предназначенных для работы в высотных условиях, коллекторных электрических машинах переменного тока, снижение износа коллекторов в коллекторных электрических машинах переменного тока.

Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертации:

1. Проанализированы существующие способы снижения износов щёток в электрических машинах. Заслуживают внимания применение дополнительных щёток, выполненные из тефлона, дисульфида молибдена и токоведущие щётки в структуру которых добавлен ДМ.

2. Исследовано влияние снижения содержания влаги и толщины ПП при работе машин постоянного тока герметизированного исполнения в высотных условиях (температура  $t=+120^{\circ}\text{C}$ , давление  $P=15\text{мм.рт.ст.}$ ) на износ токоведущих щёток. Установлено, что снижение содержания влаги в атмосфере приводит к повышению коэффициента трения и при стабильной ПП увеличивает износ токоведущих щёток в испытуемых машинах в 3,5 раза по отношению к нормальным условиям. Снижение содержания влаги в сочетании с уменьшением толщины ПП (за счёт повышенной степени герметизации) приводит к увеличению износов до 35 раз. Определяющим фактором в этом случае является снижение сопротивления ПП.

3. Материал коллектора (медь, кадмиевая бронза, хромовая бронза) оказывает активное влияние на износ щёток при работе в высотных условиях. Наименьший износ щёток обеспечивают коллектора, выполненные из хромовой бронзы (в случае применения коллектора, выполненного из хромовой бронзы, износ уменьшился в 1,7 раза относительно медного коллектора).

4. Наибольшая эффективность СЩ, выполненной из ДМ, имела место в случае использования коллектора, выполненного из хромовой бронзы. Установка СЩ на коллекторах из медного профиля позволяет снизить износы щёток при работе в нормальных и высотных условиях в сочетании с

плюсовыми и минусовыми температурами в 2,4 раза, при материале кадмиевая бронза в 2,9 раза, при материале хромовая бронза в 7 раз.

5. В герметизированных двигателях мощностью 5 Вт с щётками Г-21А установка СЩ при работе в термобарокамере с температурами +120°C и -60°C, при давлении 15 мм.рт.ст. привела к уменьшению искрения, увеличению потребляемого тока и уменьшению частоты вращения, однако характеристики двигателей соответствуют ТУ на их поставку.

6. Длительное хранение (один год и один год девять месяцев) не оказало активного влияния на характеристики двигателей, оборудованных СЩ. Параметры двигателей после хранения соответствовали ТУ на их поставку.

7. Двигатели мощностью 2,5 и 5 Вт с токоведущими щётками марок МГС-7 и Г-21 и коллекторами, изготовленными из меди и хромовой бронзы, оборудованные СЩ успешно прошли типовые испытания и были рекомендованы Кировским филиалом агрегатного завода к внедрению в серийное производство.

8. Проведены работы по исследованию скорости образования ПП и её величины на авиационном стартёр-генераторе ГС-12ТОК (при работе электрической машины в обесточенном состоянии и под нагрузкой) ряда отечественных марок щёток (ЭГ-74, ЭГ-54П, ЭГ-75, ЭГ-4, ЭГ-61А, ЭГ-61). Как наиболее эффективные выделены щётки ЭГ-61А и ЭГ-74.

9. Разработана методика ускорения образования ПП в многощёточных системах за счёт включения в систему токопередачи электрощёток, обладающих повышенной скоростью образования ПП.

10. Проведена оценка эффективности ускорения процесса образования ПП и её величины на авиационном генераторе ГС-12ТОК в заводских условиях за счёт включения в систему токопередачи наряду со штатными щётками щёток, обладающих высокой скоростью образования ПП. Проведены лётные испытания щёток при использовании ПОЩ ЭГ-74 и ЭГ-61А с разным и одинаковым давлением на штатные и ПОЩ. По результатам лётных испытаний как наиболее перспективные, обеспечивающие высокий ресурс токоведущих



щёток и скорости образования ПП были выбраны щётки ЭГ-61А (не пропитанные).

11. По результатам лётных испытаний применение щёток ЭГ-61А (не пропитанных) при пониженном давлении на все щётки привело к увеличению ресурса в 4 раза (ожидаемого ресурса более чем в 4 раза) с обеспечением постоянства сопротивления ПП в процессе эксплуатации. Результаты работ подтверждены 4 актами лётных испытаний и рекомендованы в серийное производство.

12. В настоящее время АО «Лепсе» ведёт подготовку к внедрению ПОЩ в серийное производство, проведены испытания опытного генератора, оборудованного ПОЩ ЭГ-61А (4 шт.) и штатным щётками МГС-7 с давлением 500-550 г на ударную прочность. Проверку на ударную прочность генератор выдержал, механических повреждений щёток и пружин не обнаружено [приложение IX].

13. Работа «Применение нанотехнологий для снижения износа щёток авиационного стартёр-генератора» была награждена Премией Кировской области в области науки и техники в 2012 г. [приложение X].

14. Разработана методика определения оптимального положения щёток в коллекторных машинах переменного тока с щёткодержателями неподвижно установленными в корпусе двигателя. Смещение щёток при их постоянном положении достигается за счёт смещения коллектора. Методика апробирована на коллекторных двигателях переменного тока приводов МШУ-1,8-230, МШУ-2-230, МШУ-2,2-230, МШУ-2-230П и МШУ-2,4-230. Результаты внедрены в серийное производство на двигателях трёх мощностей: 1,8; 2 и 2,2 кВт. Смещение щёток (за счёт поворота коллектора) проведено по направлению вращения на одно коллекторное деление с уменьшенным числом витков обмотки полюсов для компенсации подмагничивающего действия реакции якоря. Реальный годовой экономический эффект за счёт экономии обмоточного провода составил 2,7 млн. руб. (2006г). Искрение на 1 балл меньше, чем при штатном исполнении [приложение V].

15. Разработана конструкция щётчного узла, защищённого патентом [40], обеспечивающая повышенную механическую устойчивость контакта щётка-коллектор (за счёт смещения щёток параллельно штатному положению по направлению вращения на половину тангенциального размера щётки), обеспечивающая снижение радиопомех по мощности и напряжению, а также износ щёток на 35%. Эффективность подтверждена актом промышленных испытаний [приложение VII].

16. Проведены работы на коллекторном двигателе переменного тока мощностью 2,4 Квт по оценке влияния материала коллектора (профиль марки ПКМ - медный и ПКМС – медь с добавкой серебра) на эффективность применения СЩ, с расчётом микротемператур в зоне контакта щётка-коллектор. У коллекторов, выполненных из профиля марки ПКМ установка СЩ приводит к увеличению износа токоведущих щёток из-за увеличения максимальной температуры выше критического значения (400°C). Применение профиля марки ПКМС позволило уменьшить максимальную температуру до 240 °С. Имело место снижение износов токоведущих щёток в 4 раза. Снижение микротемпературы в зоне контакта обусловлено уменьшением коэффициента трения щётка – коллектор.

17. Проведены расчёты по оценке влияния элементов щёточно-коллекторного узла при номинальном режиме работы двигателя на максимальную температуру в зоне контакта щётка – коллектор. У коллектора, выполненного из профиля марки ПКМ на температуру активнее всего влияют жесткость токоведущей щетки, жесткость материала коллектора и температура рекристаллизации. У коллектора, выполненного из профиля марки ПКМС на температуру активнее всего влияют высота рельефа, толщина ПП и плотность материала коллектора.

18. Составлена физическая модель износа токоведущих щёток Г-33И при установке СЩ на коллекторе, выполненном из профиля марки ПКМС при варьировании частотой вращения, удельным давлением на смазывающую и токоведущие щётки.

19. Составлена физическая модель износа коллектора из профиля марки ПКМС при варьировании частотой вращения, шириной токоведущей щётки и удельного давления на токоведущие щётки. Составлена физическая модель износа коллектора из профиля марки ПКМС при установке СЩ с варьированием частотой вращения, удельным давлением на смазывающую и токоведущие щётки. Для двигателей привода МШУ-2,4-230М определено оптимальное давление на токоведущие щётки и СЩ при котором износ коллектора минимальный. Установка СЩ на двигателе привода МШУ-2,4-230М с токоведущими щётками Г-33И при оптимальном давлении на смазывающую щётку по результатам ресурсных испытаний позволило уменьшить износ коллектора в 2 раза [приложение VIII].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авилов В.Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока / В.Д. Авилов; М.: Энергоатомиздат, 1995. 237 с.
2. Авилов В.Д., Веселка Ф. Коммутация в тяговых двигателях с новым скользящим контактом // Международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» / ОмГУПС.- Омск, 2013. - С. 12-19.
3. Агапов М.М. Совершенствование систем ремонта и повышение работоспособности оборудования подвижного состава метрополитена в условиях эксплуатации: Диссертация на соискание ученой степени канд.техн.наук: Специальность 05.22.07. -М., 1992. -123 с
4. Арнольд Е.А. Динамо-машина постоянного тока. - СПб, 1909. 214 с.
5. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения.- М.: Физматгиз, 1963.
6. Байсадыков М.Ф. К вопросу о надёжности работы контакта щётки с коллектором в электрических машинах // Международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» / ОмГУПС.- Омск, 2013. - С. 19-23.
7. Барвинский А.П. Электрооборудование самолетов. Учебник для средних специальных учебных заведений гражданской авиации / Барвинский А.П., Козлова Ф.Г. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
8. Белый В.А., Кончиц В.В., Мешков В.В. Влияние материала электрощёток на свойства коллекторных плёнок.// Электротехника- 1977-№12,- С. 43-46.
9. Брейттуэйт Е.Р. Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / Пер. с англ. – М.: Химия, 1967.
10. Вейлер С.Я. Действие смазок при обработке металлов давлением / С.Я. Вейлер, В.И. Лихтман. М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 230 с.

11. Веселка Ф. Перспективы развития электрических машин со скользящим контактом с применением тефлона // Международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» / ОмГУПС.- Омск, 2013. - С. 59-67.
12. Вилькин М.А., Семенов Ю.И., Никифоров Ю.Н. Исследование структуры и электросопротивления коллекторных пленок, образованных щетками на основе твердых смазок с различной электропроводностью // Электротехника, 2003, №12. С 24-27.
13. Глушкин А.Я., Сысоева Л.П., Степанов В.П. Повышение надежности работы скользящего контакта введением в щетку фторопласта. // Электротехника, - 1971. №9. С 34-36.
14. Деменков Э.А. Повышение эффективности работы узлов трения с низкомодульными твердосмазочными покрытиями. Автореф. дис. . канд. техн. наук. Тверь, 1994.- 24 с.
15. Демкин П.С., Забоин В.Н. Прогнозирование технического состояния систем токосъема электроэнергетических машин // Научн. – техн. ведомости СПбГТУ. 1997. №4
16. Джафф, Риттенхауз Проведение материалов в космических условиях // Ракетная техника. – 1962. - №3
17. Дисульфид молибдена / Технические условия ТУ 48-19-133-90 – 22с.
18. Дмитриев М.М. Планирование эксперимента при решении задач электромеханики. // Конспект лекций.М.: изд-во МЭИ. 1981. 48 с.
19. Дридзо М.Л. Работа машин постоянного тока в условиях высокого вакуума // Электротехника. – 1965. - №7.
20. Дрожжина М.Н. Некоторые результаты испытаний покрытий и композиционных материалов на основе дисульфида молибдена в вакууме при высоких температурах // Трение и изнашивание при высоких температурах. - М.: Наука, 1973.-С. 83-87.

21. Духовский В.А. Смазочные свойства диффузионных покрытий из дисульфида молибдена с различной кристаллической структурой. // Физико-химическая механика материалов. – 1974. - №1.

22. Духовский Е.А. Смазывающая способность диффузионных покрытий дисульфида молибдена при высоких температурах.- В сб. Проблемы трения и изнашивания.- Киев.: изд-во Техника.-1974.

23. Изотов А. И., Мамаев Г. А., Тимошенко В. Н., Никулин С. В., Изотов С. А. Снижение износов узлов токосъема за счет применения смазывающих щеток [Электронный ресурс] // Общество, наука, инновации: всероссийская ежегодная научно-техническая конференция: НПК-2014. - Киров, 2014. - С.2012-2017

24. Изотов А. И., Тимошенко В. Н., Фоминых А. А. Снижение износа щеток в генераторе авиационного исполнения ГС-12 ТОК: Совершенствование электромеханических преобразователей энергии: Межвузовский тематический сборник научных трудов. - Омск, ОмИИТ. 2010г. с.11-18 .

25. Изотов А. И., Тимошенко В.Н. и др. Влияние длительного воздействия плюсовых и минусовых температур на износ щеток и образование политурных пленок // Наука - производство - технологии - экология. - 2006. - Т. 4 . - С. 235-237

26. Изотов А.И. и др. Влияние винтовой канавки на температуру коллектора/ Наука-Производство-Технология-Экология.-2005

27. Изотов А.И. и др. Исследование эффективности использования дисульфида молибдена на коллекторных машинах общепромышленного применения / Наука-Производство-Технология-Экология.-1998.

28. Изотов А.И. Определение оптимальных параметров дополнительных полюсов машин, работающих при резкопеременных циклических нагрузках [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (05.09.01) / Ом. ин-т инженеров ж.-д. транспорта. - Омск: 1974. - 19 с.

29. Изотов А.И., Изотов С.А., Кириллов П.В. и др. Исследование возможности пропитки углеграфитовых пористых. Сборник материалов Вят ГТУ Наука-Производство-Технология-Экология.-1998. 89-72 с.

30. Изотов А.И., Изотов С.А., Тимошенко В.Н., Прокошев Д.К., Белугин А.В. Оценка влияния искрения в набегающем крае токоведущих щеток на эффективность смазывающих щеток [Электронный ресурс] / Общество, наука, инновации: всерос. ежегод. научно-практич. конференция. / ВятГУ. - Киров, 2013. - С.2032-2034.

31. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Беспалов В.Я., Леготин А.Б., Тимошенко В.Н. Снижение износа щеток электрических машин герметичного исполнения / Ж. Механизация и электрификация сельского хозяйства № 4, 2008, с. 24-26

32. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Беспалов В.Я., Тимошенко В.Н., Фоминых А.А., Соболев Д.В. Снижение износа щёток в коллекторных электрических машинах переменного тока Ж. Электричество 2017. Вып. №2. – с. 50-53.

33. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Беспалов В.Я., Фоминых А.А., Тимошенко В.Н., Новиков Л.И., Никулин С.В., Изотов С.А. Применение смазывающих щеток для снижения износа элементов узлов токосъема в электрических машинах Ж. Электричество 2015. Вып. №3. – с. 53-57.

34. Пат. 2291530 Российская федерация, МПК Н01R 39/04 Коллекторная электрическая машина переменного тока Изотов А.И., Мамаев Г.А., Изотов С.А., Тимошенко В.Н. и др. - №2005124243/09; заявл. 29.07.2005; опубл. 10.01.2007. - Бюл. № 1.

35. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Никулин С.В., Тимошенко В.Н., Фоминых А.А. Уменьшение износов щеток генератора авиационного исполнения: Ж. Электричество №11. 2012г. с. 60-62.

36. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Новиков Л.И., Тимошенко В.Н., Фоминых А.А., Прокошев Д.К. Влияние щеточного перекрытия на радиопомехи и рабочие характеристики коллекторного двигателя переменного тока / XIV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Труды МКЭЭЭ-2012. Крым, г.Алушта, 2012, с.136-138

37. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н. и др. Оценка эффективности улучшения коммутации в коллекторных машинах переменного

тока за счет смещения щеток // Наука - производство - технологии - экология" / ВятГУ. - Киров, 2008. - Т. 3 : - С. 205-207

38. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н. и др. Способ снижения радиопомех в коллекторных машинах переменного тока // Наука - производство - технологии - экология" / ВятГУ. - Киров, 2008. - Т. 3 : - С. 213-214

39. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н. и др. Уменьшение износов щеток в генераторе авиационного исполнения ГС-12ТОК // Ежегодная открытая Всероссийская научно-техническая конференция "Общество, наука, инновации" (НТК-2011) / ВятГУ. - Киров, 2011

40. Пат. 2309498 Российская федерация, МПК H01R 39/44 Щеточно-коллекторный узел коллекторной электрической машины переменного тока Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н. и др. - №2006115216/09; заявл. 02.05.2006; опубл. 27.10.2007. - Бюл. № 30.

41. Полезная модель 91479 Российская Федерация, МПК H01R 39/00 Щёточно-коллекторный узел Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н. и др. - №2009139461/22; заявл. 26.10.2009; опубл. 10.02.2010. - Бюл. № 4

42. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н. Применение твердой смазки для снижения износов щеток в машинах авиационного исполнения / 7-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2008» // Сб. матер. Международной науч. - техн. конф.: Москва, 2008

43. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н., Фоминых А.А. Снижение износов щеток стартер-генератора авиационного исполнения XIII-я Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», сборник трудов конференции, Крым, Алушта, 2010. с. 68

44. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Тимошенко В.Н., Шабардин В.А., Изотов С.А., Фоминых А.А. Снижение износов щеток электрических машин авиационного исполнения / VII Международная конференция «Энергетика и электроника» ЭЛМАШ-2009 // Тезисы докладов: Москва, 2009 г., с.108-110



45. Изотов А.И., Никулин С.В., Новиков Л.И. Изотов С.А, Фоминых А.А. Снижение износов токоведущих щеток за счет применения смазывающих щеток, выполненных из дисульфида молибдена. Электромеханические преобразователи энергии. Межвузовский тематический сборник научных трудов. Под редакцией В. Д. Авилова. Издательство: Омский государственный университет путей сообщения Омск, 2014. С. 11-16.

46. Изотов А.И., Никулин С.В., Тимошенко В.Н., Фоминых А.А., Прокошев Д.К. Повышение ресурса узлов токосъема Ж. Техника в сельском хозяйстве №4 2013. С.25.

47. Изотов А.И., Никулин С.В., Тимошенко В.Н., Фоминых А.А., Прокошев Д.К. Физическая модель износа токоведущих щеток [Электронный ресурс] / Общество, наука, инновации (НТК-2013): ежегод. открыт. всерос. науч.-техн. конф., / ВятГУ – Киров, 2013. С. 2028-2031.

48. Изотов А.И., Новиков Л.И., Фоминых А.А., Тимошенко В.Н., Мамаев Г.А. Оценка эффективности применения смазывающей щетки в коллекторных двигателях переменного тока [Электронный ресурс] / Общество, наука, инновации: всерос. ежегод. научно-практич. конференция/ ВятГУ. - Киров, 2013. - С.2035-2037

49. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Снижение износа щеток за счет применения твердой смазки на основе дисульфида молибдена // Наука - производство - технологии - экология. - 2006. - Т. 4 . - С. 232-234

50. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Влияние материала коллектора и смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена, на износные свойства электрощеток в высотных условиях// Наука - производство - технологии - экология / ВятГУ. - Киров : Изд-во ВятГУ, 2007. - Т. 4 : - С.265-270

51. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Влияние некоторых факторов на износ щеток в коллекторном двигателе переменного тока // Общество, наука, инновации : всероссийская ежегодная научно-техническая конференция: НТК-2012 / ВятГУ. - Киров, 2012. - С.2039-2041

52. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Влияние щеточного перекрытия на радиопомехи и рабочие характеристики коллекторного двигателя переменного тока // Общество, наука, инновации : всероссийская ежегодная научно-техническая конференция: НТК-2012 / ВятГУ. - Киров, 2012. - С.2042-2043

53. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. К выбору марки щетки для коллекторной машины переменного тока // Наука-производство-технологии-экология. - 2004. - Т. 4 . - С. 138-139

54. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Коллекторный двигатель переменного тока с улучшенными технико-экономическими показателями // Общество, наука, инновации : всероссийская ежегодная научно-техническая конференция: НТК-2012 / ВятГУ. - Киров, 2012. - С.2044-2046

55. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Модернизированный двигатель привода МШУ-1.8-230 // Наука - производство - технологии - экология. - 2003. - Т. 4 . - С. 125-126

56. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. МШУ-2,2-230 с уменьшенным износом щеток // Наука-производство-технологии-экология. - 2004. - Т. 4 . - С. 132-133

57. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Настройка коммутации в коллекторной машине переменного тока мощностью 2,4 кВт // Ежегодная открытая Всероссийская научно-техническая конференция "Общество, наука, инновации" (НТК-2011) / ВятГУ. - Киров, 2011

58. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Результаты летных и моторных испытаний генераторов ГС-12ТОК, оборудованных политуруобразующими щетками // Наука - производство - технологии - экология / ВятГУ. - Киров, 2009. - Т. 1 : - С.253-255

59. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Снижение износа щеток в электрических машинах // Наука - производство - технологии - экология. - 2003. - Т. 4 . - С. 117-118

60. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Снижение износа щеток специального генератора // Наука-производство-технологии-экология. - 2005. - Т. 6 . - С. 134-135

61. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Способ ускоренного образования нанопленок на коллекторах машин постоянного и переменного тока // Общество - наука - инновации: всероссийская научно-техническая конференция/ Киров, 2010. - Т. 2 : - С. 268-270

62. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Эффективность снижения износа щеток ЭГ-84М, ЭГ-84УМК в случае применения смазывающей щетки выполненной на основе дисульфида молибдена // Наука-производство-технологии-экология. - 2005. - Т. 6 . - С. 158-159

63. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. и др. Эффективность сочетания доработок в МШУ-1, 8-230 // Наука-производство-технологии-экология. - 2004. - Т. 4 . - С. 146-147

64. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. Повышение ресурса и надежности узлов токосъема / Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в современном мире» Сборник трудов по материалам научн.-практ. конфер. в IV т. /Москва: Ар-Консалт, 2013.-т.1-с.120-125

65. Изотов А.И., Тимошенко В.Н., Изотов С.А., Прокошев Д.К., Трушков К.О., Коханчук Н.Д. Настройка коммутации в коллекторных машинах переменного тока за счёт смещения траверсы [Электронный ресурс] // Общество, наука, инновации: всероссийская ежегодная научно-практическая конференция: НПК-2016. / ВятГУ. - Киров, 2016. - С.1841-1848.

66. Изотов А.И., Тимошенко В.Н., Изотов С.А., Фоминых А.А., Прокошев Д.К., Тимина Н.В. Снижение износов элементов узлов токосъема за счет применения смазывающих щеток, выполненных из дисульфида молибдена: Электронный научный журнал ВятГУ Advance Science №4. 2014 г. с. 96-106.

67. Изотов А.И., Тимошенко В.Н., Фоминых А.А., Изотов С.А. Снижение уровня радиопомех в коллекторных машинах переменного тока: Ж. Техника в сельском хозяйстве №1. 2014г. с. 28-29.

68. Изотов А.И., Тимошенко В.Н.; Фоминых А.А., Никулин С.В., Новиков Л.И., Изотов С.А., Мамаев Г.А. Влияние механических факторов в коллекторных машинах переменного тока на уровень радиопомех: Ж. Электротехника №8. 2013г. с. 57-59.

69. Изотов А.И., Фоминых А.А., Тимошенко В.Н., Изотов С.А., Тимина Н.В. Повышение надежности щеточно-контактного устройства электрических двигателей Ж. Механизация и электрификация сельского хозяйства №4. 2013. С. 32-33.

70. Изотов А.И., Фоминых А.А., Тимошенко В.Н., Тимина Н.В., Леготин А.Б. Уменьшение износов щеток генератора постоянного тока в пусковых режимах: Ж. Механизация и электрификация сельского хозяйства. Вып. №5. 2014 – с. 24-26.

71. Изотов А.И., Шабардин В.А., Изотов С.А. и др. Способ определения времени формирования политурной плёнки на коллекторе электрической машины А.С. № 1468346 (СССР), 1988.

72. Казаков Ю.Б., Андреев В.А., Сунихин В.П. Энергоэффективность асинхронных двигателей при вариациях режимных и конструктивных параметров / Под общ. Ред. Ю.Б. Казакова / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - Иваново. 2012. – 132 с.

73. Калихман В. Л., Дуксина А.Г. Влияние материала контактного кольца на характеристики скользящего контакта // Электротехника. – 1973. №11. С. 36-38.

74. Карасев М.Ф. Коммутация коллекторных машин постоянного тока. - Москва; Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1961. - 224 с.

75. Карасев М.Ф., Котов В.Н., Тимошин В.И. Воздействие коллекторной пленки на коммутацию. – Тр. ОмИИЖТ, 1975. С 23-25.

76. Кармадонов А.Ф., Брудный А.И., Кирьянов А.М. Исследование износа и долговечности дисульфидмолибденовой пленки при граничном трении //Твердые смазочные покрытия. -М.: Наука, 1977. С. 53-61.

77. Качин О.С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Томск – 2008

78. Качин С.И., Качин О.С. Результаты исследования влияния механического состояния коллектора и подшипников на процессы износа в скользящем контакте электрической машины. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 6. С. 5-9.

79. Ким К.К., Колесов С. Л., Изотов А. И. и др. Снижение износа электрощеток в электрических машинах за счет применения дисульфида молибдена. ICEE-2000. Proceedings IV International on Electrotechnics, Electromechanics and Electrotechnology. p.318-319. Russia, Moscow, Klazma, 2000.

80. Клозе Р. Дж. Материалы для скользящих электрических контактов, используемых в сверхвысоком вакууме / Пер. ВЦП. – 1967.

81. Ковтун В.П. Исследование некоторых закономерностей трения и износа в электрических скользящих контактах и возможности увеличения его износостойкости. Автореф. дис. . канд. техн. наук. Новочеркасск. 1974,- 22 с.

82. Колесов С. Л. Улучшение трибохарактеристик твердощеточного контакта электрических машин с помощью дисульфида молибдена: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.01. - Москва, 2001. - 167 с.

83. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 1. Энергия, 1972.- 648 с.

84. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1968. 480с.

85. Крагельский И.В. Фрикционное взаимодействие твердых тел. Трение и износ. 1980. Т.1. С. 12-29.

86. Лавринович Л.Л. Экспериментальные исследования искрения в скользящем контакте// Вестник электропромышленности. 1956. №1. С.54-57.

87. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин. М. Энергия, 1974. -321 с.
88. Майорова Л.А. Твёрдые неорганические вещества в качестве высокотемпературных смазок. – М.: Наука, 1971.
89. Мануйлов Н.Я., Никифоров Ю.Н., Медведева В.И. Токосъемная углеродистая ЭЩ. А.С.СССР № 746794 М. Кл2 Н01 R43/12., 1974 г.
90. Мейер Р.К. К вопросу о работе скользящего контакта. - ЦБТИ НИИЭП. М., 1960.
91. Мешков В.В., Савкин В.Г. Формирование пленок переноса в скользящем электрическом контакте. Трение и износ, 1980, т.1, №15, с. 884 - 890.
92. Нейкирхен И. Угольные щётки и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока. М.-Л. ОНТИ, 1937.
93. Нелин В.И., Ложкин Л.В., Богатырёв Н.Я. Механика скользящего контакта – М.: Транспорт, 1966.
94. Никулин С. В. Улучшение свойств щеточного контакта электрических машин: диссертация кандидата технических наук: 05.09.01 / Никулин Сергей Викторович; [Место защиты: Воронеж. гос. техн. ун-т]. - Киров, 2008. - 190 с.
95. Плохов И.В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема турбогенераторов: Дис. д-ра техн. наук.- Санкт-Петербург , 2001. – 362 с.
96. Плуталова Л.А. Современные представления о механизме трения пары металл-графит // Труды третьей всесоюзной конференции по трению и износу в машинах.-М.: Изд-во АН СССР, 1960, т.2.
97. Полякова Н.В., Вульф В.А., Широкое поле применения фторуглерода// Контакты.: 2002, № 12. С 3.
98. Пугина Л.И., Синявская М.Д., Максимчук И.М. Дисульфид молибдена. Киев, «Наукова Думка», 1970.
99. Сапиро Д.Н.. Электрооборудование самолетов: Учеб. пособие для авиационных техникумов. – М.: Изд-во Машиностроение, 1977. – 304 с.

100. Севидж Р.Х. Смазка графита парами воды и износ угольных щёток // Прикладная механика и машиностроение. – 1952. - №3.
101. Сентерюхина Л.Н., Опарина Е.М., Твердые дисульфид-молибденовые смазки.: М. Химия, 1966.
102. Скороспешкин А. И. Электрические свойства скользящего контакта / А. И. Скороспешкин, Б. И. Костылев, Р. Ф. Бекишев // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. — 1968. — Т. 190 : Электрические машины. — [С. 176-185].
103. Скороспешкин А.И. Механизм контактирования пары коллектор щетка Текст./ А.И.Скороспешкин, Г.И.Цопов, В.Р.Тарановский //Тезисы докладов Республиканской н-т. конференции, Харьков, 1984.
104. Скороспешкин А.И. Новые положения теории коммутации коллекторных электрических машин Текст./ А.И.Скороспешкин, В.Р. Тарановский// Вестник УГТУ, 4.2: Электромеханика и электротехнологии.- Екатеринбург.- 1995.
105. Смазочное действие дисульфида молибдена при воздействии радиации и других факторов. [Сб. статей]. М. Атомиздат 1976.
106. Тимошенко В.Н., Изотов А.И. Снижение износов элементов узлов токосъема за счет применения смазывающих щеток // Международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» / ОмГУПС.- Омск, 2013. - С. 128-132.
107. Тимошенко В.Н., Изотов А.И., Изотов С.А., Никулин С.В. Оценка возможности замены дисульфида молибдена производства ОАО СМК "Металлург" на дисульфид молибдена зарубежного производства [Электронный ресурс] // Общество, наука, инновации. Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция. / ВятГУ. - Киров, 2015. - С.1024-1026
108. Тимошенко В.Н., Изотов А.И., Никулин С.В., Изотов С.А Увеличение ресурса работы стартер-генератора за счет применения политуруобразующих

щеток [Электронный ресурс] // Общество, наука, инновации. Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция. / ВятГУ. - Киров, 2015. - С.1027-1029

109. Тимошенко В.Н., Изотов А.И., Тимина Н.В. Влияние микротемпературы в зоне контакта щётка-коллектор на образование оксида в случае применения смазывающих щёток [Электронный ресурс] // Общество, наука, инновации. Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция. / ВятГУ. - Киров, 2016. - С.1849-1859

110. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ/ М.: Машиностроение, 1993. 146 с.

111. Трояновская Г.И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы.: М. Машиностроение, 1968. 180 с.

112. Трояновская Г.И., Лобова Т.А. Исследование и перспективы самосмазывающихся материалов на основе диалкогенидов тугоплавких металлов. // Трение и износ – 1980, т. 1 № 2.

113. Фейгин Л.А., Рожанский В.Н. О влиянии адсорбционных слоёв на диспергирование графита // Известия АН СССР. – 1957, №5

114. Фиалков А.С., Вилькин М.А. Работа щеток марки ВТ-5 в условиях больших высот. // Вестник электропромышленности, 1962, №1. С. 44.

115. Фомина Г.В. Влияние озона на сопротивление контакта ЭЩ -коллектор в коллекторных электродвигателях постоянного тока малой мощности//Электротехника. 1983. №5. С.24-26.

116. Фоминых А. А. Оценка влияния твердой смазки на трибохарактеристики узлов скользящего токосъема: диссертация кандидата технических наук: 05.09.01 / Фоминых Антон Анатольевич; [Место защиты: Нац. исслед. ун-т МЭИ]. - Киров, 2015. - 233 с.

117. Харламов В.В., Сергеев Р.В., Шкодун П.К., Ахмедзянов Г.Г. Устройство для измерения интенсивности искрения на коллекторе электрической машины. МПК H01R 39/58 Патент на полезную модель №53820, 2005г.



118. Хольм Р. Сила трения в контакте графитовой щётки как функция температуры в контактных пятнах. Стрекопольская угольная компания, Пенсильвания, 22, 1961.
119. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы. 1961. 464 с.
120. Цопов Г.И., Овсянников В.Н., Елшанский Н.А. Механизм контактирования скользящего контакта из углеграфитовых материалов /Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 1 (43). С. 111-114.
121. Штихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Машиностроение, 1969. 713 с.
122. Янченко А.В. Повышение эффективности и надежности твердощеточных систем токосъема турбогенераторов// Дис. . канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1988.-114 с.
123. Bollman W., Spreadborough L.J. Action of Graphite as a Lubricant. – Nature, 1960. P. 29-30
124. Bragg W.L. Introduction to crystal analysis 6. Z., Bell and Son, Ltd., London, 1928.
125. Campbell, Kozak. The wear of carbon brushes in dry atmospheres. Trans. ASME, 1948.
126. Deacon R.F., Goodman J.F. Lubrication by lamellar solid. – Proc. 1958.
127. Elco R. A., Hughes W.F. Magnetohydrodynamic pressurization of liquid metal bearings. Wear, 5 1962, p. 198 – 212.
128. Lankaster J.K. The relationship between the wear of carbon brush materials and their elastic moduli, British journal of applied physics, 1963.
129. Schroter F. Die Kommutieruhgsfähigkeit der Kohlebuste // Electrotechnische Zeitschrift.- 1962. bd. 14, Heft 3.
130. Shobert, Erle. Recent advances in sliding contacts including space application, IEEE transactions on parts materials and packaging, 1966.
131. Spreadborough L.J. The frictional behaviout of graphite. – Wear, 1962.

132. Van Brunt C., Svage R.H. "Carbon-Brush Contact Films" General Electric Review. 1944, v.47, 7, p. 17.38.

## ПРИЛОЖЕНИЕ I

### Список использованных сокращений

ДМ – дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ).

ПП – политурная плёнка.

СЩ – смазывающая щётка.

ПОЩ – политурообразующая щётка.

МШУ – машина шлифовальная угловая.

ТУ – технические условия.

ПСИ – приёмо-сдаточные испытания

## ПРИЛОЖЕНИЕ П

Утверждаю  
Зам. технического директора ОАО «Лепсе»  
Старков Ю.А. \_\_\_\_\_  
«16» \_\_\_\_\_ 2008 г.



### АКТ

По результатам лётных и моторных испытаний двух опытных генераторов ГС-12ТОК № Е0721 и №07146 с политуруобразующими щётками ЭГ-61А (пропитанными), установленными на генераторах для ускорения образования политурной плёнки и снижения износов щёток (руководитель работ: зав. кафедрой, к.т.н., доцент Изотов А.И., ответственный исполнитель: преподаватель Тимошенко В.Н.).

На вспомогательной силовой установке типа ТА6, ТА12 имеет место повышенный износ электрощёток и коллекторов генератора ГС-12ТО, ГС-12ТО-1, ГС-12ТОК. Из-за отсутствия генераторного режима и длительного вращения якоря генераторов после запуска ВСУ на холостом ходе при частоте вращения 5680-7000 об/мин. Многократные выходы из строя генераторов в эксплуатации происходят при наработке от 130 моточасов и более (гарантийный ресурс 700-2000 моточасов).

В результате исследований, проведённых ВятГУ установлено, что причина повышенного износа электрощёток состоит в отсутствии политурной плёнки на коллекторах якорей, которая сжигается при запуске за счёт искрения по переходным процессам наброса и сброса нагрузки и не успевает восстановиться на холостом ходу. В связи с проведёнными работами было рекомендовано для ускорения образования политурной плёнки вместо 6 штатных щёток поставить политуруобразующие щётки ЭГ-61А (пропитанные) с удельным давлением, соответствующим штатным щёткам.

В соответствии с этими рекомендациями было оборудовано 2 генератора ГС-12 ТОК. Генератор № Е0721 был направлен в ЗАО «Полёт» г.Ульяновск для лётных испытаний, а генератор № 07146 в ОАО Научно-производственное предприятие «Аэросила» г.Ступино для моторных испытаний. Через 107 моточасов комплект щёток на генераторе № Е0721 был заменён на новый, который отработал 95 моточасов.

В таблице 1, 2 представлены результаты замера высоты щёток после испытаний (предельно допустимая высота щёток 15 мм). Генератор ГС-12 ТОК № Е0721 с политуруобразующими щётками обеспечил удовлетворительную работу на объекте АН-124-100 в течении 202 моточасов (1585 лётных часов) без замечаний ЗАО «Полёт», однако, политурная плёнка, как показали замеры, практически отсутствовала. Наблюдался износ коллектора 038 – 042 – 036 мм. по дорожкам на диаметр), а также повышенное биение (0,085 – 0,01 – 0,05 мм. при выпуске 0,015 мм.).

Таблица 1 – Износ щёток после лётных испытаний (107 м/ч).

Высота щёток при выпуске, мм			Износ, мм		
28,2	25,7	26,2	2,4	1,0	3,5
25,4	27,8	26,1	1,0	2,9	3,1
26,3	25,9	28,2	2,1	5,3	4,4
28,0	25,2	26,5	3,6	2,2	3,7
26,4	27,5	26,6	2,0	2,0	6,9
25,8	25,9	27,9	0,8	3,0	5,2

■ - политуруобразующие щётки

Таблица 2 – Износ щёток после лётных испытаний (95 м/ч).

Высота щёток при выпуске, мм			Износ, мм		
25,7	24,7	24,55	1,3	2,3	2,45
24,0	25,2	24,51	3	1,8	2,49
25,74	24,21	27,2	1,26	2,9	0,8
26,9	24,7	22,5	0,1	2,3	4,5
25,7	26	25,4	1,3	1	1,6
25,0	22,4	26,8	2	4,6	0,2

■ - политуруобразующие щётки

В таблице 3 представлены результаты ресурсных стендовых испытаний на вспомогательном газотурбинном двигателе ТА12(А) генератора № 07146, оборудованного политуруобразующими щётками. Генератор работал с приводом, имеющим обгонную муфту, которая отключает его после окончания стартёрного режима (т.е. генератор работал только в импульсном режиме без режима холостого хода). Нарботка генератора составила 8259 запусков в течении 1046 часов. Как показывают измерения у генератора № 07146, наблюдается общее увеличение сопротивления политурной плёнки. Суммарное сопротивление политурной плёнки 1 и 2 дорожек, которое наводится 4 политуруобразующими щётками составило 0,207 Ом; 2 и 3 дорожек, которое наводится 5 политуруобразующими щётками, составила 0,354 Ом, что подтверждает эффективность применения политуруобразующих щёток. Большему числу политуруобразующих щёток соответствует большее сопротивление политурной плёнки (сопротивление политурной плёнки до моторных испытаний было 0,1 Ом).

Таблица 3 – Ресурсные испытания генератора № 07146

1 дорожка	2 дорожка	3 дорожка
0,2	2	1,4
1,5	0,4	2,2
1,5	2,1	0,4
1,5	0,1	1
2,4	0,1	1
1,7	1,6	0,1
Σ7,8	Σ6,3	Σ6,1

█ - политуруобразующие щётки

#### Заключение

1. Генератор ГС-12ТОК № 07146 с политуруобразующими щётками ЭГ-61А (пропитанными) с хорошими результатами прошёл эквивалентно-циклические ресурсные стендовые испытания на вспомогательном газотурбинном двигателе ТА12(А) с приводом, имеющим обгонную муфту, отключающую его после окончания стартового режима. Нарботка составила 8250 запусков в течении 1046 часов с относительно низким износом щёток, отсутствием износа коллектора, увеличенным сопротивлением политуруной плёнки.
2. Генератор с политуруобразующими щётками ЭГ-61А (пропитанными) может быть рекомендован для внедрения на объектах, имеющих обгонную муфту. Применение политуруобразующих щёток позволит уменьшить вес генератора и получить дополнительный реальный экономический эффект за счёт разницы цен щёток МГС-7 и ЭГ-61А.
3. Генератор ГС-12ТОК № E0721 с политуруобразующими щётками ЭГ-61А (пропитанными) (6 штук) и остальными штатными щётками МГС-7 обеспечил удовлетворительную работу на объекте Ан-124-100 в течении 202 моточасов (1585 лётных часов) в составе ТА12 без замечаний ЗАО «Полёт».

Зав. каф. ЭМА, к.т.н. Изотов А.И. \_\_\_\_\_

Преподаватель каф. ЭМА Тимошенко В.Н. \_\_\_\_\_

Ведущий инженер ОАО «Лепсе» Головин Н.А. \_\_\_\_\_

Главный конструктор ОАО «Лепсе» Царегородцев Б.В. \_\_\_\_\_

## ПРИЛОЖЕНИЕ III



Утверждаю

\_\_\_\_\_  
Директора ООО «Лепсе»

*Сидоров*  
11 \_\_\_\_\_ 2010 г.

### АКТ

По результатам лётных испытаний опытного генератора ГС-12ТОК № Е0721 с политурообразующими щётками ЭГ-74 (не пропитанными), установленными на генераторе для ускорения образования политурной плёнки и снижения износов щёток (руководитель работ: зав. каф. ЭМА ВятГУ, к.т.н., доцент Изотов А.И., ответственный исполнитель: преподаватель каф. ЭМА ВятГУ Тимошенко В.Н.).

На вспомогательной силовой установке типа ТА-6, ТА-12 имеет место повышенный износ электрощёток и коллекторов генератора ГС-12ТО, ГС-12ТО-1, ГС-12ТОК. Из-за отсутствия генераторного режима и длительного вращения якоря генераторов после запуска ВСУ на холостом ходу при частоте вращения 5680-7000 об/мин. Многократные выходы из строя генераторов в эксплуатации происходят при наработке от 130 моточасов и более (гарантийный ресурс 700-2000 моточасов).

В результате исследований, проведённых ВятГУ установлено, что причина повышенного износа электрощёток состоит в отсутствии политурной плёнки на коллекторах якорей, которая сжигается при запуске за счёт искрения по переходным процессам наброса и сброса нагрузки и не успевает восстановиться на холостом ходу. В связи с проведёнными работами было рекомендовано для ускорения образования политурной плёнки вместо 6 штатных щёток поставить политурообразующие щётки ЭГ-74 (не пропитанные) с давлением 550-600 г.

В соответствии с этими рекомендациями был оборудован генератор ГС-12ТОК (№ Е0721), который был направлен в ЗАО «Полёт» г.Ульяновск для лётных испытаний.

Показатель наработки двух комплектов щёток составил 389 моточасов, высота последнего комплекта щёток указана в таблице 1. Учитывая, что предельно допустимая высота щёток составляет 17 мм, показатель наработки двух комплектов щёток до предельно допустимого размера составит 492 часа. В соответствии с письмом АТБ г.Ульяновск от 20.06.2009г. №696, средний показатель наработки одного комплекта штатных щёток на генераторе ГС-12ТО из состава ВСУ ТА-12 составляет 75-80 моточасов.

Таким образом, использование политурообразующих щёток позволяет увеличить ресурс щёток генератора ГС-12ТОК из состава ВСУ ТА12 в 3 раза.

Сопrotивление политурной плёнки в среднем по коллектору равно 0,01 Ом. Поверхность коллектора и щёток не имеет подгаров. Поверхность щёток гладкая и зеркальная. Наблюдается износ коллектора 1,08 – 1 – 0,7 мм (по дорожкам на диаметр), биение 0,02 – 0,01 – 0,06 мм (при выпуске 0,015 мм).

Таблица 1 – Высота последнего комплекта щёток

Высота щёток, мм		
23,5	24,6	22,4
23	21,2	25,8
24,6	21,3	24
21,6	24,1	23,2
23,5	22,4	24,2
25,4	21	24,2

 - политурообразующие щётки

### Заключение

1. Генератор ГС-12ТОК № E0721 с политурообразующими щётками ЭГ-74 (не пропитанными) (6 штук) и остальными штатными щётками МГС-7 обеспечил удовлетворительную работу на объекте Ан-124-100 с двумя комплектами щёток в течении 389 моточасов (до размера щёток 21 мм при предельно допустимом значении 17 мм) в составе ТА12 без замечаний ЗАО «Полёт». Расчётный ресурс до предельно допустимой высоты щёток равен 492 моточаса при среднем показателе наработки одного комплекта щёток 75-80 моточасов.

2. Для дальнейшего увеличения ресурса и снижения износа коллектора рекомендуется проведение летних испытаний с использованием политурообразующих щёток ЭГ-74 (не пропитанных) при снижении давления на штатные щётки до значения 550-600 г, а также заменой политурообразующих щёток на смазывающие щётки, выполненные на основе дисульфида молибдена с давлением 100-150 г.

Зав. каф. ЭМА ВятГУ, к.т.н. Изотов А.И. \_\_\_\_\_

Преподаватель каф. ЭМА ВятГУ Тимошенко В.Н. \_\_\_\_\_

Ведущий инженер ОАО «Лепсе» Третьяков Е.С. \_\_\_\_\_

Главный конструктор ОАО «Лепсе» Царегородцев Б.В. \_\_\_\_\_



## ПРИЛОЖЕНИЕ IV



Утверждаю  
Директор по техническому  
развитию ОАО «Лепсе»  
Старков Ю.А.

АКТ

### По результатам лётных испытаний ГС-12ТОК

Работа проводилась Вятским государственным университетом, кафедрой ЭМА (руководитель работ: зав. кафедрой ЭМА Изотов А.И.; ответственный исполнитель ассистент каф. ЭМА Тимошенко В.Н.; исполнители: ассистент Фоминых А.А., аспирант Прокошев Д.К. совместно с работниками ОАО «Лепсе»).

На основании данных эксплуатации (письмо ЗАО АК «Полет» №188 АТБ от 19.03.20012 г.) средняя наработка одного комплекта штатных щеток МГС-7 генераторов ГС – 12ТОК, используемых на самолетах АН – 124 – 100 составляет 105 моточасов.

По рекомендациям ВятГУ были проведены испытания по оценке влияния установки политуруобразующих щёток на сопротивление политурной плёнки на коллекторе генератора ГС-12ТОК. Для проверки эффективности политуруобразующих щёток два генератора ГС-12ТОК были оборудованы политуруобразующими щётками. Один генератор (Е0721) – щётками ЭГ-74 (не пропитанными) с давлением на политуруобразующие щётки 550-600 г и штатном давлении на щётки МГС-7. Второй (Е7146) – щётками ЭГ-61А (пропитанными) при штатном давлении на политуруобразующие щётки и щётки МГС-7. Генераторы были направлены в ЗАО «Полёт» г. Ульяновск для лётных испытаний.


После лётных испытаний сопротивление политурной плёнки со щётками ЭГ-74 составило 0,013 Ом. Поверхность коллектора и щёток имеет ребристый вид, имеется незначительное выкрашивание набегающего края одной политуруобразующей щётки. Нарботка двух комплектов щёток до размера высоты одной из щёток 21 мм составил 389 моточасов. Сопротивление политурной плёнки с щётками ЭГ-61А (пропитанными) после лётных испытаний составило 0,013 Ом. Поверхность коллектора гладкая, без подгаров, ребристость щёток и коллектора отсутствует. Нарботка, обеспеченная двумя комплектами щёток - 170 моточасов.

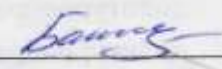
В дальнейшем оба генератора прошли восстановительный ремонт и были оборудованы политуруобразующими щётками ЭГ-61А (не пропитанными) и ЭГ-74 (не пропитанными). Давление на штатные и политуруобразующие щётки 500-550 г. Среднее значение сопротивления политурной плёнки после ПСИ в случае


щёток ЭГ-74 0,21 Ом. При щётках ЭГ-61А (не пропитанных) – 0,14 Ом. После лётных испытаний сопротивление политурной плёнки в случае применения щёток ЭГ-74 составило 0,013 Ом. Поверхность щёток и коллектора имеет ребристый вид, на набегавшем крае одной политурообразующей щётки имеется скол глубиной 1,5 мм, шириной 2 мм. Нароботка составила 130 моточасов.


На генераторе, оборудованном щётками ЭГ-61А (не пропитанные), сопротивление политурной плёнки после лётных испытаний - 0,14 Ом. Визуально на коллекторе наблюдалась установившаяся политурная плёнка, поверхность щёток ровная, без рисок (длительность наработки на одном комплекте щёток увеличилась со 105 до 210 моточасов). После окончания вторых лётных испытаний при осмотре на щётках среднего ряда на набегавшем крае были обнаружены незначительные сколы. При дефектации якоря биение коллектора и перепад ламелей по средней дорожке превышал допустимое значение. В связи с этим генератор на третьи лётные испытания не направлялся.


Таким образом, в результате проведённых исследований наработка щёток генератора ГС-12ТОК за счёт применения политурообразующих щёток ЭГ-61А (не пропитанных) была увеличена в два раза.

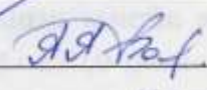
Главный конструктор ОАО «ЛЕПСЕ» Утенков С.В. 


Инженер – конструктор 11 отдела ОАО «ЛЕПСЕ» Бакин Е.Н. 

Начальник отдела 48 ОАО «ЛЕПСЕ» Третьяков Е.С. 

Зав. каф. ЭМА ВятГУ, к.т.н. Изотов А.И. 

Ассистент каф. ЭМА ВятГУ Тимошенко В.Н. 

Ассистент каф. ЭМА ВятГУ Фоминых А.А. 

Аспирант каф. ЭМА ВятГУ Прокошев Д.К. 

## ПРИЛОЖЕНИЕ V

Утверждаю  
\_\_\_\_\_  
технического директора  
АО «Электромашиностроительный  
завод «Лепсе»  
\_\_\_\_\_  
Фролов А.В.  
АКТ

внедрения в серийное производство на АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе» (г. Киров) технического решения, предложенного ВятГУ (кафедра «Электрические машины и аппараты»), руководитель работ зав. кафедрой, к.т.н., доцент Изотов А.И., ответственный исполнитель ст. преподаватель Тимошенко В.Н.

В результате исследовательских работ, проведённых кафедрой «Электрические машины и аппараты» ВятГУ с АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе» по улучшению технико-экономических показателей угловых шлифовальных машин МШУ-1,8-230; МШУ-2-230; МШУ-2,2-230 было рекомендовано оптимальное положение щёток на коллекторе, которому соответствовало их смещение на одно коллекторное деление по направлению вращения относительно штатного состояния. Реализация предложенного технического решения достигается пересоединением концов секции обмотки якоря к коллектору. Смещение щёток (при постоянном моменте) приводит к уменьшению потребляемых токов, частоты вращения за счёт подмагничивания магнитной системы продольной составляющей МДС реакции якоря, что ведёт к перегреву двигателя. Для восстановления характеристик ВятГУ было рекомендовано уменьшение числа витков главных полюсов: 10 витков с каждого полюса у МШУ-1,8-230, МШУ-2-230 и 5 витков в МШУ-2,2-230. Степень искрения в модернизированных машинах уменьшилась с 1 ½ до 1 ¼ балла, относительно установки щёток на геометрическую нейтраль.

Паспортная работа, проведённая АО «Лепсе» (технический отчёт №25 от 2004 г.) подтвердила эффективность предлагаемого решения. В 2005 г. предлагаемая модернизация в МШУ-1,8-230; МШУ-2-230; МШУ-2,2-230 была внедрена в серийное производство. Программа выпуска в 2006 г. 330 тыс. шт. Получен реальный годовой экономический эффект за 1 год использования с 1.01.2007 по 31.12.2007 равный 2 674 169 руб.

Главный конструктор АО «Лепсе» \_\_\_\_\_ Утенков С.В.

Ведущий конструктор ОГК АО «Лепсе» \_\_\_\_\_ Шихов В.Н.

Начальник бюро ОИН \_\_\_\_\_ Катаргин П.Г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ VI



Утверждаю

Технического директора ОАО «Лепсе»

*Сидоркин*  
12 / 2008 г.

### АКТ

Внедрения в серийное производство на ОАО «Лепсе» (г. Киров) технического решения, предложенного ВятГУ (кафедра электрические машины и аппараты, руководитель работ: зав. кафедрой, к.т.н., доцент Изотов А.И., ответственные исполнители: к.т.н., доцент Новиков Л.И.; преподаватель Тимошенко В.Н.) по оптимальному положению щёток на коллекторе в МШУ-2-230П.

В результате исследовательских работ, проведённых кафедрой ЭМА с ОАО «Лепсе» по снижению искрения щёток в МШУ-2-230П с использованием индикатора искрения, подключенного к разнополярным щёткам, который позволяет оценивать энергию искрения, было установлено, что причина повышенного искрения обусловлена неоптимальным расположением щёток на коллекторе. Опыты проводились на двигателях с поворотной магнитной системой. За счёт смещения магнитной системы имитировалось смещение щёток. Оптимальному расположению щёток соответствует смещение щёток против направления вращения на 1 коллекторное деление относительно штатного положения. В дальнейшем опыты проводились с использованием якорей, у которых имитировалось смещение щёток на 1 и 2 коллекторных деления по и против направления вращения за счёт переключения секций к коллекторным пластинам. Проведённые исследования подтвердили оптимальное смещение щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения. Характеристики машины соответствуют ТУ на её поставку, искрение щёток уменьшилось на 1 балл. Смещение щёток на 1 коллекторное деление против направления вращения, которое было применено в МШУ-2-230П с коротким коллектором (22 мм. вместо 25 мм), также показало высокую эффективность. Искрение было уменьшено более чем на 1 балл.

Предложенное техническое решение внедрено с 01.09.2008г. в серийное производство (извещение МКВИ 11.09.2367).

Зав. каф. ЭМА, к.т.н. Изотов А.И. \_\_\_\_\_

Доцент каф. ЭМА, к.т.н. Новиков Л.И. \_\_\_\_\_

Ведущий испытатель НТЦ Катаргин П.Г. \_\_\_\_\_

Начальник КБ9 ОАО «Лепсе» Янковенко А.А. \_\_\_\_\_

Главный конструктор по НИОКР ОАО «Лепсе» Шабардин В.А. \_\_\_\_\_

## ПРИЛОЖЕНИЕ VII

Утверждаю

Зам. технического директора ОАО «Лепсе»

Старков К.А. 

«22»

2012



### АКТ

промышленных испытаний угловой шлифовальной машины МШУ-2,4-230М в случае применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена и смещения токовых щёткодержателей по направлению вращения на половину ширины щётки

Работа проводилась Вятским государственным университетом, кафедрой ЭМА (руководитель работ: зав. кафедрой ЭМА Изотов А.И.; ответственные исполнители: ст. преподаватель каф. ЭМА Тимошенко В.Н., аспирант Фоминых А.А., исполнитель Прокошев Д.К. совместно с работниками ОАО «Лепсе»).

На основании рекомендаций ВятГУ были проведены испытания по оценке влияния положения щёток на рабочие характеристики и искрение с использованием методики, разработанной Тимошенко В.Н., когда имитировалось смещение щёток за счёт смещения магнитной системы (искрение измеряется визуально и с помощью индикатора искрения). Сделана оценка эффективности применения смещённых щёткодержателей по направлению вращения параллельно штатному состоянию на половину тангенциального размера щётки (рис.1) на характеристики и уровень радиопомех (щётки остаются на геометрической нейтрали за счёт поворота коллектора на одно коллекторное деление по направлению вращения). Оценка эффективности применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена в случае, когда смазывающие щётки располагались на набегающем крае штатной (рис.2) и когда щёткодержатель под смазывающую устанавливался в корпусе машины в положении 1 либо 2 (рис.3) (смазывающие щётки изготавливались по промышленной технологии, разработанной аспирантом Фоминых А.А., руководитель Изотов А.И.). В работах использовались 4 марки щёток: Г-33И, Г-33МИ, ЭГ-61А с размером 8x16мм и ЭГ-84УМК размером 6,3x16мм. Оптимальному положению щёток при постоянном тормозном моменте соответствует их смещение на 0,85мм по направлению вращения. Это положение позволяет обеспечить требуемые характеристики машины даже в случае уменьшения числа витков обмотки возбуждения на 6%. Применение смещённых щёткодержателей а так же смещённых щёткодержателей в сочетании со смазывающей щёткой, выполненной на основе дисульфида молибдена, приводит последовательно к уменьшению уровня радиопомех. Применение смазывающей щётки при оптимальной подаче смазки в зону контакта, рассчитанной с использованием физических моделей, разработанных ст. преподавателем Тимошенко В.Н., позволило увеличить ресурс базовой щётки Г-33И в 2,2 раза, щётки Г-33МИ в 1,7 раза. Применение щётки ЭГ-61А и ЭГ-84УМК в сочетании со смазывающей увеличило ресурс относительно базовой щётки Г-33И (при наличии

смазывающей) в 2,3 раза и в 2,1 раза соответственно. Применение щётки ЭГ-84УМК с размером 6,3x16мм в сочетании со смазывающей позволило увеличивать ресурс по отношению к базовой щётке головного образца серии Г-33И без смазывающей щётки больше, чем в 4 раза.

В соответствии с обсуждением результатов работы на техсовете ОАО «Лепсе» принято решение о изготовлении 4 модернизированных двигателей МШУ по промышленной технологии, оборудованных смазывающими щётками, для длительных ресурсных испытаний и решения вопроса о внедрении смазывающих щёток в серийное производство.

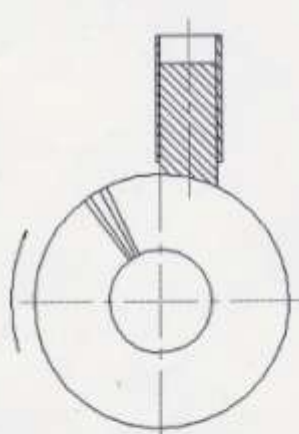


Рис. 1 - Смещённый щёткодержатель

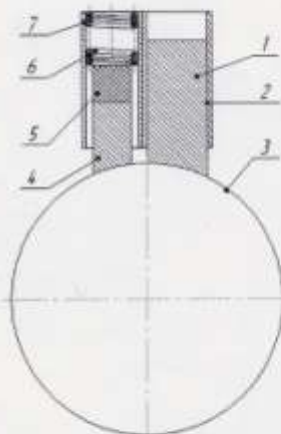


Рис. 2 – Щёткодержатель со смазывающей щёткой

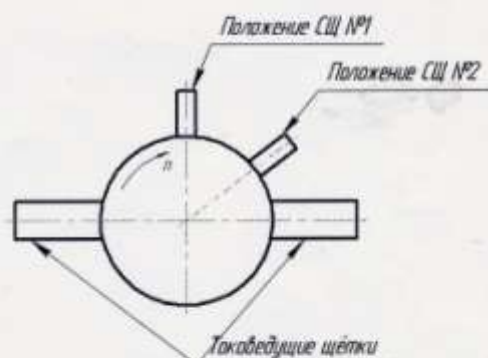


Рис. 3 – Установка смазывающих щёток

1 – токоведущая щётка, 2 – щёткодержатель токоведущей щётки, 3 – коллектор, 4 – смазывающая щётка, 5 – несущая часть смазывающей щётки, 6 – пружина смазывающей щётки, 7 – щёткодержатель смазывающей щётки

Ведущий инженер НТЦ Катаргин П.Г. Katargin

Ведущий инженер-конструктор НТЦ Шихов В.Н. Shihov

## ПРИЛОЖЕНИЕ VIII

Утверждаю:

зам. технического директора

АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе»



Фролов А.В.

### АКТ

испытаний угловой шлифовальной машины МШУ-2,4-230М в случае применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена

Работы выполнялись Вятским государственным университетом, кафедрой ЭМА. Руководитель работ: зав. кафедрой ЭМА Изотов А.И., ответственный исполнитель: ст. преподаватель Тимошенко В.Н.

Испытания изделия МШУ-2,4-230М со щётками Г-33И размером 8x16 мм, с коллектором, изготовленным из меди с добавкой серебра – ПКМС (паспортная работа № МКВИ.11-625 2012г.), проводились на предмет оценки влияния установки смазывающей щётки, выполненной на основе дисульфида молибдена, на износ коллектора. Размеры контактной поверхности смазывающей щётки составили 4x16мм, давление на щётку составило 50г (величина давления была рассчитана по физической модели, разработанной ст. преподавателем Тимошенко В.Н.). Применение смазывающей щётки позволило уменьшить износ коллектора в 2 раза. Модернизированная МШУ-2,4-230М полностью соответствовала ТУ.

Начальник бюро ОИН

Катаргин П.Г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ IX



### ПРОТОКОЛ № 139 от 13.06.2017г.

По результатам испытаний генераторов ГС – 12ТОК  
по пункту 3.9 программы № 11- 5680 от 01.02.2017 года.

**Объект испытания: генератор ГС – 12ТОК.**

**Начало испытаний:**

11 06 2017г

**Окончание испытаний:**

13 06 2017г

**1.Цель испытаний:**

Определение целесообразности установки политуруобразующих щеток ЭГ-61А, для снижения износа штатных щеток МГС-7 генератора ГС – 12ТОК.

**2.Место проведения испытаний:**

АО "Лепсе", испытательная станция 52.

**3.Материалы испытаний:**

Испытания проводились в соответствии с требованиями программы по методике ТУ № 157-69.



#### 4. Результаты испытаний:

Проверка генераторов по пункту 3.9 программы, (пункт 6.14 ТУ № 158-69) на ударную прочность без проведения испытательного режима.

Пружины использовались с усилием 500 - 550 грамм и щетки ЭГ – 61А – 6 щеток и МГС – 7 – 12 щеток.

Проверка производилась в горизонтальном положении, в нерабочем состоянии, с зафиксированным гибким валом.

Проверка проводилась с ускорением 6g, с частотой ударов от 40 до 100 ударов в минуту, при длительности импульса 20 мсек  $\pm$  40% в количестве 10000 ударов.

5. Заключение: проверку на ударную прочность генератор ГС – 12ТОК выдержал. При внешнем осмотре механических повреждений щеток и пружин не обнаружено. Все пружины находятся в пазах щеток.

Испытатель .....В.А. Синцов



## ПРИЛОЖЕНИЕ X

### **Премия Кировской области в области науки и техники присуждается**

авторскому коллективу в составе:

**ИЗОТОВА Анатолия Ивановича** – руководителя работы  
**МАМАЕВА Геннадия Александровича**  
**НИКУЛИНА Сергея Викторовича**  
**ТИМОШЕНКО Вячеслава Николаевича**

- за работу «Применение нанотехнологий для снижения износа щёток авиационного стартёр-генератора».

**Губернатор  
Кировской области**



**Н.Ю. Белых**

Основание: указ Губернатора Кировской области  
от 07.11.2012 № 140