

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВПО РГУПС)

На правах рукописи

ХОМЧЕНКО ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА
КОЛЛЕКТОРНЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ НА
ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛЕЙ

Специальность: 05.22.07 - Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Петрушин А.Д.

Ростов-на-Дону – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ТЕРМИНОВ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	16
1.1 Анализ классической теории коммутации	16
1.2 Анализ теории среднелинейной коммутации	27
1.3 Анализ теории оптимальной коммутации	29
Выводы по главе 1	37
ГЛАВА 2 ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА КОММУТАЦИИ	38
2.1 Физическая сущность процесса изменения тока в коммутируемых секциях якоря	38
2.2 Зависимость коммутации тока от параметров щеток	44
2.3 Влияние типа обмотки якоря и его конструкции	60
Выводы по главе 2	66
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛЕЙ	68
3.1 Изготовление опытной партии щеткодержателей и предварительные испытания	68
3.2 Определение области безискровой работы	71
3.3 Сравнительный анализ области безискровой работы опытных и штатных щеткодержателей.	81
Выводы по главе 3	84
ГЛАВА 4 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ	85
Выводы по главе 4	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
Приложение 1	100

Приложение 2	101
Приложение 3	106
Приложение 4	107

СПИСОК ТЕРМИНОВ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ВЭЛНИИ – Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения

КМБ – колесно-моторный блок

КПД – коэффициент полезного действия

ООО «ПК «НЭВЗ» – общество с ограниченной ответственностью "Производственная компания "Новочеркасский электровозостроительный завод"

ОАО «ДМЗ» – открытое акционерное общество «Демиховский машиностроительный завод»

ОАО «РЖД» – открытое акционерное общество «Российские железные дороги»

ТЭД – тяговый электродвигатель

ЭДС – электродвижущая сила

ЭПС – электрический подвижной состав

МПТ – машина постоянного тока

ОБР – область безыскровой работы

ВВЕДЕНИЕ

Будущее развитие железнодорожного транспорта в России связано с широким использованием бесколлекторных тяговых электродвигателей (ТЭД). На электровозах отечественного производства ЭП10, ЭП20, 2ЭС5, 2ЭС10 эксплуатируются асинхронные ТЭД с короткозамкнутым ротором с тяговыми преобразователями иностранного производства. ТЭД постоянного тока пока еще доминируют на отечественном подвижном составе. На железных дорогах РФ в настоящее время эксплуатируется 174 электровоза с асинхронными ТЭД и 10466 электровозов с коллекторными ТЭД, что составляет 98,4%. Аналогичная ситуация и с парком тепловозов. Находятся в эксплуатации 50 тепловозов с асинхронными ТЭД и 10096 тепловозов с коллекторными ТЭД, что составляет 99,5%.

Тем не менее коллекторные ТЭД будут постепенно заменены. Однако процесс перехода на бесколлекторные двигатели будет длительным и полного исключения ТЭД постоянного тока из тяги поездов в ближайшее время не произойдет. Это объясняется следующими причинами:

- асинхронный ТЭД с силовым преобразователем и системой управления существенно дороже, чем ТЭД постоянного тока;
- отсутствуют силовые полупроводниковые приборы российского производства в полной мере способные заменить продукцию ведущих мировых производителей силовой электроники;
- отсутствие в достаточном количестве средств для коренной модернизации производства и технического обслуживания ТЭД с асинхронными тяговыми электродвигателями.

Даже после полного перехода на бесколлекторные ТЭД небольшая ниша для использования ТЭД постоянного тока останется из-за соображений безопасности и живучести подвижного состава, так как в отличие от

бесколлекторных электрических машин, ТЭД постоянного тока может управляться и без помощи полупроводниковых элементов.

ТЭД электровоза имеет следующие конструктивные элементы: остов, главные и дополнительные полюсы, якорь с обмоткой, коллектор, щеткодержатели и щетки, подшипниковые узлы. На железнодорожном транспорте ТЭД работают в более тяжелых условиях по сравнению с их аналогами в промышленных стационарных установках и других видов транспорта, этим обусловлены конструктивные отличия ТЭД от других электрических машин.

ТЭД расположен под кузовом электровоза, его габаритные размеры ограничены приближением к путевой структуре и другими конструктивными элементами кузова. Двигатели подвергаются значительным внешними воздействиям: вибрациям, ударам при прохождении колесных пар по неровностям пути. ТЭД работают при значительном перепаде температуры окружающей среды от +40 до — 50 °С, в условиях значительных изменений напряжения в тяговой сети. Имеется большая вероятность проникновения в них пыли, в том числе металлической, влаги, снега.

Обеспечить надежную работу ТЭД в таких жестких условиях можно высоким качеством разработки и изготовления, аккуратной эксплуатацией и качественным ремонтом. Особое внимание следует уделять коллекторно-щеточному аппарату.

Через щетки, укрепленные в щеткодержателях, электрический ток поступает на обмотку якоря ТЭД. Материал щеток - графита, получаемый при нагреве в электрической печи сажи, кокса, антрацита и некоторых других компонентов. При изготовлении щеток стремятся к тому, чтобы коэффициент трения был невысоким, щетки были бы упругими, износоустойчивыми.

Щетка имеет такую толщину, что как правило перекрывает несколько коллекторных пластин, это обстоятельство значительно ухудшает коммутационный процесс. Более тонкими щетки выполнить нельзя по механическим причинам. Также, при прохождении тягового тока значительной величины

необходимо обеспечить необходимую поверхность контакта между щетками и поверхностью коллектора. Для улучшения контакта между щетками и поверхностью коллектора применяют составные щетки.

Щеткодержатель состоит из корпуса и кронштейна, которые соединяются с помощью болтового крепления. Щеткодержатели изолируются от остова двигателя, поэтому их кронштейны крепят с помощью изоляционных материалов.

Щетки прижаты к поверхности коллектора подпружиненными пальцами с регулируемым нажатием.

Компенсационная обмотка, применяемая в коллекторных ТЭД и расположенная в пазах наконечника главного полюса, служит для компенсации реакции якоря. Обмотка соединяется последовательно с обмоткой якоря. В ТЭД применяется хордовая компенсационная обмотка из прямоугольной медной шины, выполняемая катушками, которые можно устанавливать и снимать независимо от других обмоток.

Дополнительные полюса, состоят из сердечников и катушек. Магнитный поток, необходимый для компенсации реакции якоря, относительно мал, поэтому дополнительные полюса имеют меньшие размеры и больший воздушный зазор. Сердечники дополнительных полюсов, как правило, выполняют сплошными, так как потери в их сердечниках, из-за пульсаций магнитного потока, невелики. В двигателях пульсирующего тока и машинах с неблагоприятной коммутацией, для уменьшения вихревых токов сердечники выполняют шихтованными. Магнитная цепь, включающая дополнительные полюса, не насыщена для обеспечения линейной характеристики.

Катушки дополнительных полюсов изготавливают из полосовой меди. Число дополнительных и главных полюсов одинаково для обеспечения нормальной работы ТЭД.

Такие конструктивные элементы как остов, главные и дополнительные полюса с обмотками образуют активную часть ТЭД, обеспечивающую электромеханическое преобразование энергии.

Надежность электрического железнодорожного транспорта в эксплуатации во многом определяется типом установленного ТЭД. Опыт эксплуатации электровозов на железных дорогах РФ свидетельствует о том, что количество отказов из-за неисправностей ТЭД постоянного и пульсирующего тока достаточно высоко и продолжает расти. После заводского ремонта количество отказов еще возрастает.

По данным анализа ОАО "РЖД" за первое полугодие 2015 года общее количество отказов ТЭД локомотивов составило 4259 случаев или от 4 до 5 случаев на 1 млн. км пробега. За аналогичный период 2014 года 3482 случая, рост удельного показателя составил 24,6%. Из приведенных данных отказы ТЭД электровозов - 2382 случая (рисунок В1), ТЭД тепловозов - 1877 случаев.

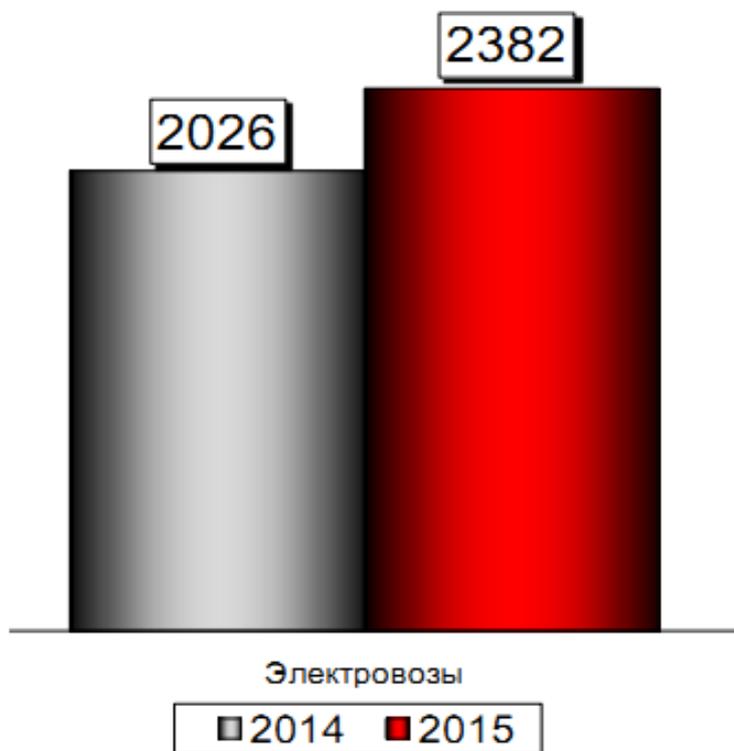


Рисунок В1. Отказы ТЭД электровозов за 1 полугодие 2015 года

Наибольшее абсолютное количество отказов ТЭД произошло на территории РФ с резко континентальным климатом: Дальневосточной железной дороге -813 случаев и Западно-Сибирской - 683 случая.

Неисправности основных узлов ТЭД за 1 полугодие 2015 года представлены на диаграмме (рисунок В2).

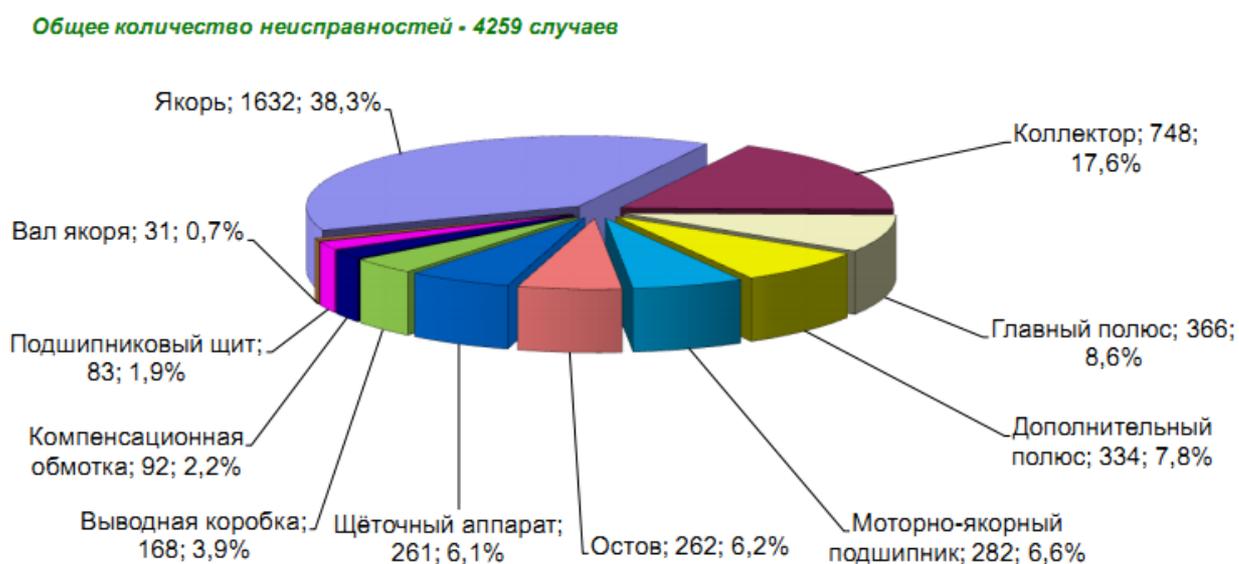


Рисунок В2. Неисправности основных узлов ТЭД

Рост отказов ТЭД произошел по следующим узлам:

- выводная коробка – 168 случаев, что составило 3,9% от общего числа отказов ТЭД локомотивов (2014 год – 83 случая), в 2,02 раза;
- щеточный аппарат – 261 случай или 6,1% (2014 год – 140 случаев), на 86,4%;
- подшипниковый щит – 83 случая или 1,9% (2014 год – 50 случаев), на 66%;
- остов – 262 случая или 6,2% (2014 год – 166 случаев), на 57,8%;
- коллектор – 748 случаев или 17,6% (2014 год – 538 случаев), на 39%;
- якорь – 1632 случая или 38,3% (2014 год – 1374 случая), на 18,8%;

– дополнительный полюс – 334 случая или 7,8% (2014 год – 324 случая), на 3,1%;

– главный полюс – 366 случаев или 8,6% (2014 год – 362 случая), на 1,1%.

Снижение отказов ТЭД произошло по следующим узлам:

– вал якоря – 31 случай или 0,7% (2014 год – 46 случаев), на 32,6%;

– компенсационная обмотка – 92 случая или 2,2% (2014 год – 100 случаев), на 8%;

– моторно-якорный подшипник – 282 случая или 6,6% (2014 год – 299 случаев), на 5,7%.

Из рисунка В2 видно, что суммарное количество отказов ТЭД, приходящихся на коллекторно-щеточный аппарат, составляет 23,7% от общего количества отказов, что свидетельствует о большой повреждаемости этого узла ТЭД.

Наибольшее абсолютное количество отказов произошло по следующим типам ТЭД:

– ТЛ-2К (электровозы ВЛ10, ВЛ11) – 895 случаев, что составило 37,6% от общего числа отказов ТЭД электровозов или 5,22 случая на 1 млн.км пробега. 2014 год – 595 случаев или 4,28 случая на 1 млн.км пробега, рост числа отказов на 50,4%;

– НБ-418 (электровозы ВЛ80) – 647 случаев (27,2%) или 2,53 случая на 1 млн.км пробега (2014 год – 685 случаев или 2,45 случая на 1 млн.км пробега), снижение на 5,5%;

– НБ-514 (ВЛ85, ВЛ65, Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К) – 334 случая (14%) или 1,14 случая на 1 млн.км пробега (2014 год – 422 случая или 1,41 случая на 1 млн.км пробега), снижение на 20,8%.

Количество отказов по основным типам ТЭД представлено на рисунке В3.

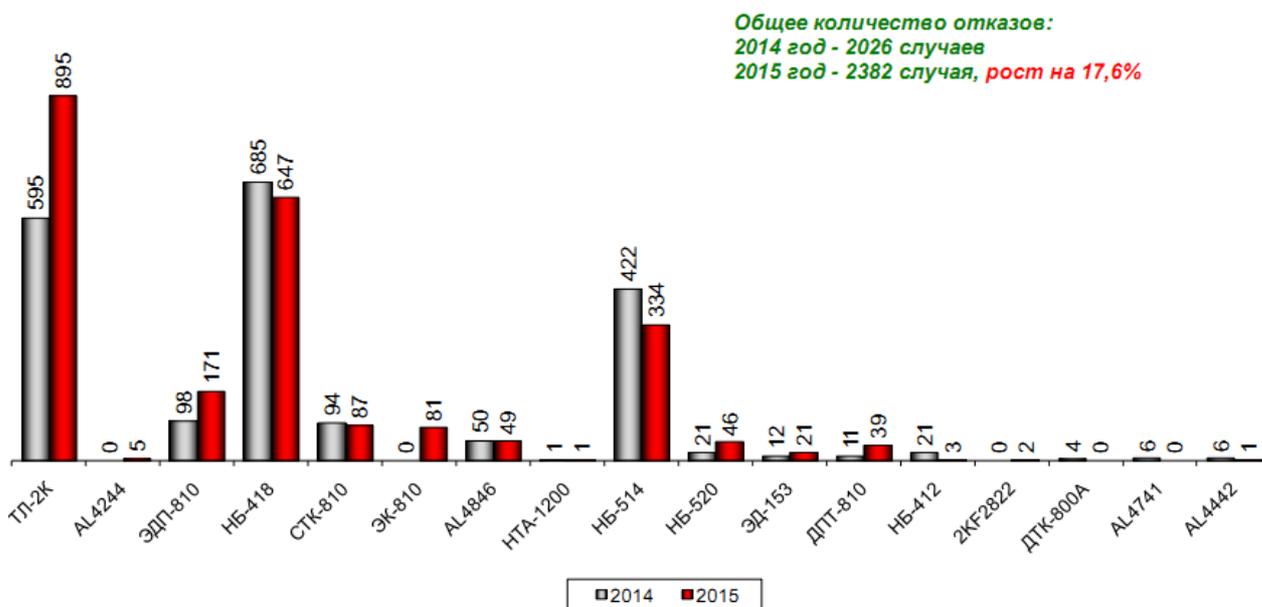


Рисунок В3. Отказы по основным типам ТЭД

Анализ замены тяговых электродвигателей после проведения ремонтов в условиях завода и в сервисных локомотивных депо показал, что качество ремонта в условиях депо на 13,3% выше, чем в условиях заводов, и удельное количество замен ТЭД составляет 4,52 сл. на одну отремонтированную секцию локомотива (5,12 сл. на одну отремонтированную секцию локомотива в условиях завода).

На электровозостроительных заводах России существует производство тяговых ТЭД постоянного тока, которое совершенствовалось десятилетиями, уровень надежности коллекторно-щеточного узла значительно вырос, но остались еще резервы для его совершенствования. Основные направления улучшения качества коммутационного процесса связаны с дальнейшим развитием теории токосъема, совершенствованием конструкции узла коммутации и улучшении свойств материалов коллекторно-щеточного узла.

Для решения этой важной и актуальной для железнодорожного транспорта РФ задачи необходима разработка новых конструктивных решений по скользящему контакту коллекторно-щеточного аппарата ТЭД, на базе уточ-

нения теоретических положений на процесс коммутации тока в якорных секциях.

Данным направлением занимались многие высшие учебные заведения и отраслевые научные школы нашей страны: Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС), Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Южно-Российский государственный политехнический университета (ЮРГПУ), Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), ВНИИЖТ, ОАО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ») и др.

Большой вклад в развитие теории коммутации и решении ряда практических проблем внесли ученые: Е. Арнольд, Л. Дрейфус, Р. Хольм, И. Нейкирхен, Н. Шенфер, М.П. Костенко, Р. Мейер, М.Ф. Карасев, Г. Тиллерс, О.Г. Вегнер, А.Б. Иоффе, В.В. Фетисов, А.С. Курбасов, В.С. Хвостов, В.П. Толкунов, П.С. Лившиц, В.В. В.Д. Авилов, Н.Б. Битюцкий, В.И. Антипов, А.С. Курбасов, В.И. Бочаров, В.Г. Щербаков, В.И. Седов, Б.И. Хоменко и многие другие [1-21].

Из теоретических и экспериментальных исследований коммутационного процесса ТЭД, выполненных в последние годы, следует отметить публикацию [22], где уточняются условия передачи тока через слой политуры коллектора, механизм изменения тока при перекрытии щеткой нескольких пластин коллектора, физические условия искрообразования под скользящим контактом. Установлена взаимосвязь между найденным условием возникновения искрения и основными факторами, влияющими на этот процесс. Из полученных аналитических соотношений разработана методика прогнозирования области безыскровой работы ТЭД и критерий его коммутационной устойчивости.

В диссертации **объектом исследования является** электрический подвижной состав с коллекторными ТЭД.

Цель работы: увеличение эксплуатационного ресурса коллекторных ТЭД электровозов путем разработки и внедрения теоретически обоснованных новых технических решений по улучшению качества коммутации ТЭД.

Предмет исследования: методы оценки и анализа коммутационной устойчивости коллекторных ТЭД электровозов, позволяющие реализовать конструкцию щеткодержателя, которая обеспечивает улучшение коммутации.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- проведен аналитический обзор и анализ основных теорий коммутационных процессов коллекторных ТЭД электровозов;
- исследована физическая сущность изменения тока в коммутируемой пассивной секции при медленном вращении якоря;
- разработан новый тип щеткодержателя, улучшающий коммутационный процесс;
- выполнены исследования по определению зоны безыскровой работы ТЭД;
- проведены эксплуатационные испытания ТЭД на электровозе.

Методы исследования: при решении поставленных задач в области исследования коммутационных процессов использованы методы теории цепей экспериментальные исследования, эксплуатационные испытания.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

- установлено, что путем целенаправленного изменения параметров и конфигурации щеток можно существенно снизить их износ и улучшить коммутационный процесс;
- разработана и испытана новая конструкция щеткодержателя для электровозов пульсирующего тока, позволяющая снизить износ щеток;
- доказано, что в процессе эксплуатации ТЭД пульсирующего тока на искровой износ щеток решающее влияние оказывают механические факторы.

Практическая ценность: представленные результаты могут быть использованы для улучшения эксплуатационных показателей коллекторных ТЭД электровозов. Эксплуатационные испытания опытных щеткодержателей показали снижение расхода электрощеток и потребности работ по механической обработке рабочей поверхности коллекторов. При эксплуатации коллекторных ТЭД можно будет достигнуть увеличения межремонтных пробегов, снижения случаев захода локомотивов на неплановый ремонт.

Реализация результатов работы: результаты диссертационной работы внедрены в эксплуатационном локомотивном депо ТЧЭ-6 Батайск - структурного подразделения Северо-Кавказской дирекции тяги - структурного подразделения Дирекции тяги - филиала ОАО «РЖД» (приложение 3).

Научные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм целенаправленного изменения параметров щеток, позволяющий улучшить качество коммутации коллекторных ТЭД;
- анализ электромагнитных и механических факторов влияющих в процессе эксплуатации на искровой износ щеток при использовании на электровозах с коллекторными ТЭД новых конструктивных решений по токосъемному узлу.

Достоверность и обоснованность основных полученных результатов диссертационной работы обеспечены:

- корректностью принятых допущений при математическом моделировании физических процессов;
- сопоставлением данных математического моделирования с экспериментальными, полученными на опытных образцах щеткодержателей.

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-практической конференции «Транспорт-2013», РГУПС, Ростов-на-Дону, 2013 год;

- Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России», РГУПС, Ростов-на-Дону, 2015 год;

Публикации и патенты. По материалам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК, получено два патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 50 наименований. Общий объем работы составляет 108 страниц, 45 рисунков, 3 таблицы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1 Анализ классической теории коммутации

В узком смысле слова под коммутацией в машинах постоянного тока (МПТ) понимают процесс изменения тока в секциях их якорной обмотки при последовательном их переключении из одной ее параллельной ветви в другую. При вращении коллектора 1 (рисунок 1.1) с окружной скоростью V_k секция 2 в процессе ее переключения из ветви 3 в параллельную ветвь 4 замыкается накоротко щеткой 5, и протекающий через нее ток коммутации i за очень малый промежуток времени изменяется от $+i_a$ до $-i_a$ (i_a – ток в параллельной ветви).

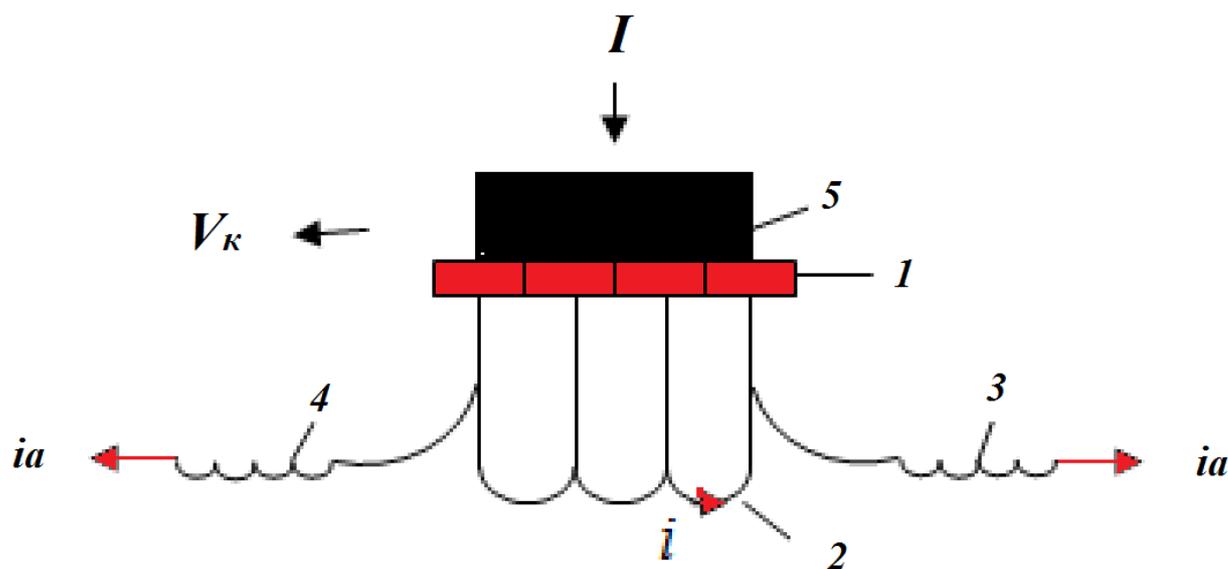


Рисунок 1.1. Коммутация тока в секции обмотки якоря

К настоящему времени предложено несколько теорий коммутации МПТ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], среди которых наибольшее распространение получили следующие:

- *классическая*, предложенная Е. Арнольдом и принявшая законченный вид у Р. Рихтера [1, 2];
- *среднепрямолинейная* Л. Дрейфуса [3];

- *оптимальная*, разработанная под руководством М.Ф. Карасева [7, 8].

Исторически первой появилась теория коммутации Е. Арнольда [1]. Для простоты анализа этого процесса он принял следующие допущения:

1) якорная обмотка выполнена в виде простой петлевой обмотки в кольцевом исполнении, т.е. реактивная ЭДС секции e_p состоит только из ЭДС самоиндукции e_c

$$e_p = e_c = -L \frac{di}{dt}, \quad (1.1)$$

где L – самоиндуктивность секции;

2) ширина щетки $b_{щ}$ равна ширине пластины коллектора b_l , а толщина межламельной изоляции b_u пренебрежительно мала, т.е. теоретический период коммутации T равен ламельному периоду t_l – времени, в течение которого рабочая поверхность коллектора перемещается на ширину его ламели

$$T = t_l = \frac{b_l}{V_k}, \quad (1.2)$$

3) щеточный контакт непрерывен, т.е. полная площадь контакта ламели со щеткой S_l равна ее рабочей площади $S_{щ}$, и при равномерном вращении коллектора ($V_k = \text{const}$) контактные поверхности набегающей S_n и сбегающей S_c ламелей, с которыми соединена короткозамкнутая секция, изменяются во времени ее коммутации t линейно

$$S_n = S_l \frac{t}{t_l} = S_l \tau_l \quad \text{и} \quad S_c = S_l \left(1 - \frac{t}{t_l}\right) = S_l (1 - \tau_l), \quad (1.3)$$

где τ_l – относительный ламельный период;

4) удельное сопротивление скользящего контакта не зависит от плотности тока, т.е. $r_k = \text{const}$;

5) активные сопротивления всех элементов коммутируемого контура «секция – щетка» пренебрежительно малы по сравнению с контактными сопротивлениями набегающей R_n и сбегающей R_c ламелей

$$R_n = \frac{r_k}{S_n} = \frac{r_k}{S_l \tau_l} = \frac{R_l}{\tau_l}, \quad (1.4)$$

$$R_c = \frac{r_k}{S_c} = \frac{r_k}{S_l (1 - \tau_l)} = \frac{R_l}{1 - \tau_l}, \quad (1.5)$$

где R_l – контактное сопротивление ламели, полностью перекрытой щеткой;

б) в зоне коммутации секции магнитное поле ДП индуцирует в ней ЭДС вращения e_k , направленную встречно реактивной ЭДС.

С учетом принятых допущений для схемы замещения коммутируемого контура (рисунок 1.2) по законам Кирхгофа была составлена следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_n &= i_a - i \\ i_c &= i_a + i \\ i_c R_c - i_n R_n &= e_p - e_k \end{aligned} \right\}, \quad (1.6)$$

где i_n и i_c – токи через набегающую и сбегающую ламели коллектора.

Для общего случая, когда $e_p \neq e_k$, с учетом (1.4) и (1.5) Е. Арнольд получил следующее решение системы уравнений (1.6):

$$i = i_a \frac{R_n - R_c}{R_n + R_c} + \frac{e_p - e_k}{R_n + R_c} = i_a (1 - 2\tau_l) + \frac{\Delta e \tau_l (1 - \tau_l)}{R_l (2 - \tau_l)}, \quad (1.7)$$

где Δe – ЭДС небаланса между e_p и e_k .

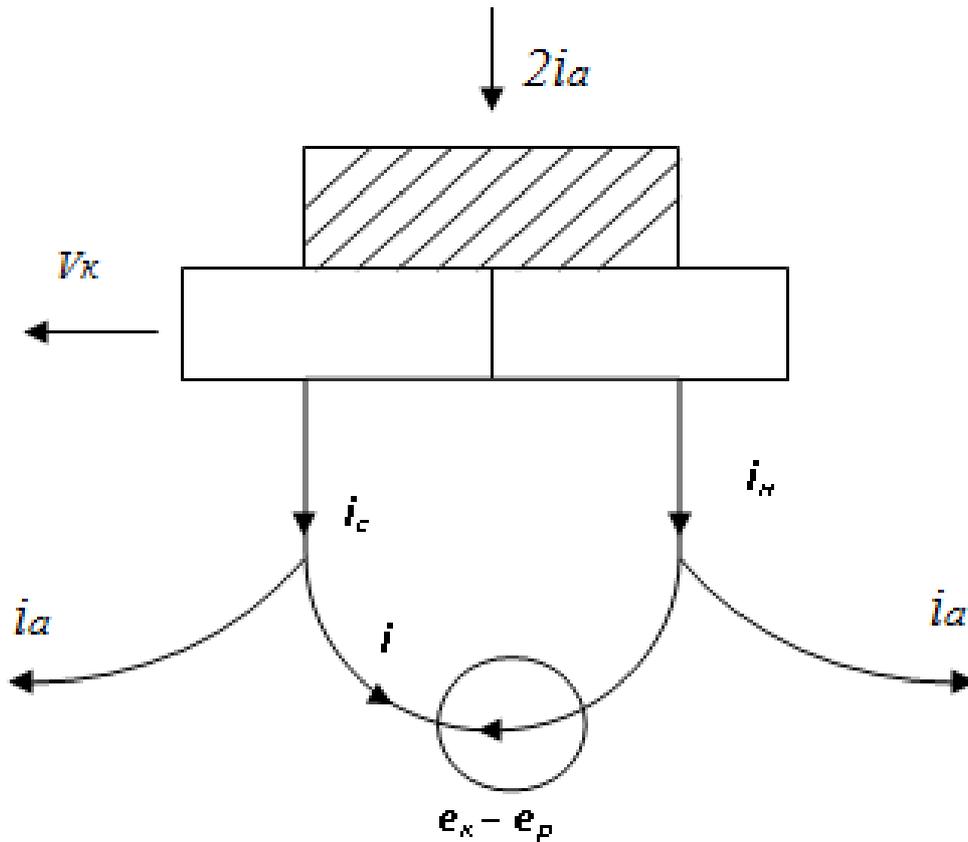


Рис. 1.2. Схема замещения электрического контура секции

Выражение (1.7) дало основание Е. Арнольду представить ток коммутации секции i как суперпозицию двух токов:

– тока прямолинейной коммутации, когда в короткозамкнутой секции отсутствуют ЭДС (в дальнейшем такую секцию будем называть пассивной)

$$i_n = i_a(1 - 2\tau_n); \quad (1.8)$$

– добавочного тока коммутации, который обусловлен действием в короткозамкнутой секции ЭДС небаланса

$$i_{\delta} = \frac{\Delta e \tau_n (1 - \tau_n)}{R_n (2 - \tau_n)} \quad (1.9)$$

Основная идея теории Е. Арнольда связана с механизмом изменения тока в короткозамкнутой секции, согласно которому ток коммутации в пассивной секции изменяется от $+i_a$ до $-i_a$ в соответствии с уравнением (1.8) по закону прямой линии (прямая 1 на рисунок 1.3) под влиянием изменяющихся контактных сопротивлений коллекторных пластин, к которым она подключена. Такой механизм изменения тока был назван коммутацией сопротивлением.

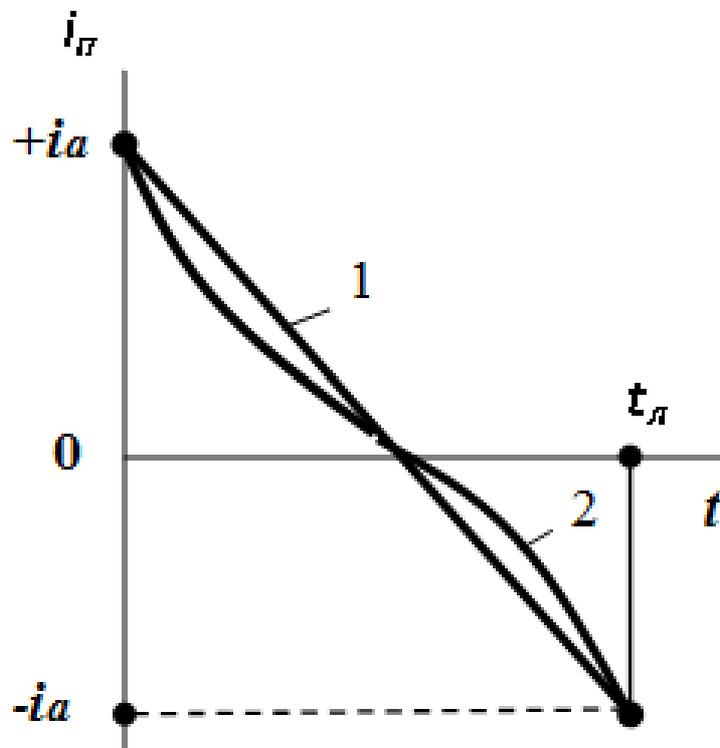


Рисунок 1.3. Коммутация тока в пассивной секции

При учете других сопротивлений контура ток коммутации в пассивной секции изменяется по кривой 2 на рисунок 1.3 и определяется следующим выражением:

$$i_n = i_a \frac{R_n - R_c}{R_n + R_c + R_s} = i_a \frac{1 - 2\tau_l}{1 + \frac{R_s}{R_l} \tau_l (1 - \tau_l)}, \quad (1.10)$$

где R_s – активное сопротивление секции и петушков коллектора.

С учетом принятых допущений для плотностей тока в набегающей J_n и сбегаящей J_n ламелях коллектора при прямолинейной коммутации Е. Арнольдом были получены следующие выражения:

$$J_n = \frac{i_n}{S_n} = \frac{i_a - i_n}{S_l \tau_l} = \frac{2i_a}{S_l} = \frac{I}{S_{щ}} = J; \quad (1.11)$$

$$J_c = \frac{i_c}{S_c} = \frac{i_a + i_n}{S_l (1 - \tau_l)} = \frac{2i_a}{S_l} = \frac{I}{S_{щ}} = J, \quad (1.12)$$

где $I = 2i_a$ – протекающий через щетку ток нагрузки.

Выражения (1.11) и (1.12) позволили Е. Арнольду сделать важный вывод о том, что при прямолинейной коммутации плотность тока под щеткой распределяется равномерно и не зависит от взаимного расположения по отношению к ней пластин коллектора, т. е. такой вид коммутации не влияет на характер распределения плотности тока в скользящем контакте. Именно это положение дало ему основание считать прямолинейную коммутацию тока в секции оптимальной, когда обеспечивается условие ее пассивности

$$\Delta e = e_p - e_k = 0. \quad (1.13)$$

Если условие оптимальности (1.13) не выполняется, то характер коммутации тока в секции будет соответствовать кривым 1 и 2 на рисунке 1.4.

Если $e_p > e_k$, то процесс изменения тока i будет иметь, по сравнению с прямолинейной коммутацией, замедленный характер (кривая 1). Такой вид коммутации принято называть замедленным. При $e_p < e_k$ ток в секции изменяется по кривой 2, и такая коммутация называется ускоренной.

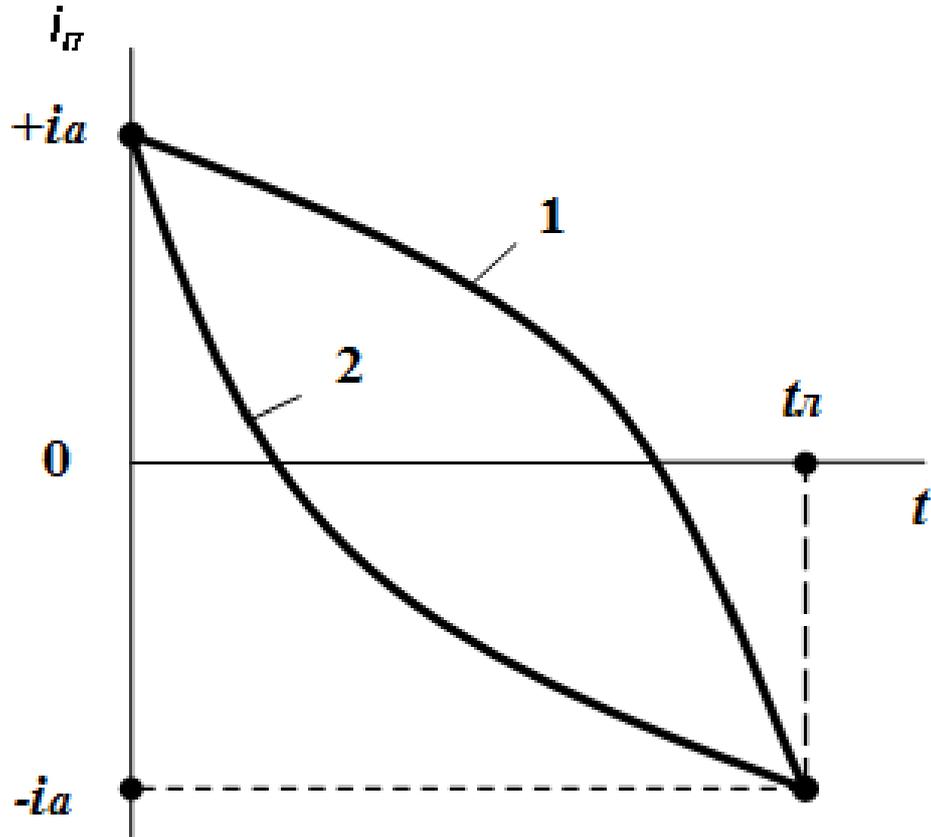


Рисунок 1.4. Коммутация тока в секции при $\Delta e \neq 0$

При $e_k = E_k = \text{const}$ и $e_p \neq \text{const}$ для добавочного тока коммутации E . Арнольдом было получено следующее интегральное уравнение:

$$i_{\partial} = \left(\frac{\tau_l}{1 - \tau_l} \right)^{-A} \frac{\Delta E}{R_l} \int \left(\frac{\tau_l}{1 - \tau_l} \right)^A d\tau_l, \quad (1.14)$$

где A – параметр коммутируемого контура

$$A = \frac{R_n t_n}{L}; \quad (1.15)$$

ΔE – среднее значение ЭДС небаланса

$$\Delta E = -L \frac{di_n}{dt} - E_\kappa = L \frac{2i_a}{t_n} - E_\kappa = E_p - E_\kappa, \quad (1.16)$$

где E_p – среднее значение реактивной ЭДС секции.

Анализ интегрального уравнения (1.14) позволил Е. Арнольду сделать следующие важные для практики выводы:

1) для устранения тока i_δ , т.е. для реализации оптимальной прямолинейной коммутации, необходима настройка ДП на выполнение следующего условия:

$$\Delta E = E_p - E_\kappa = 0. \quad (1.17)$$

Так как ЭДС небаланса ΔE пропорциональна среднему значению реактивной ЭДС, то коммутационную напряженность МПТ стали оценивать параметром E_p ;

2) ток i_δ находится в обратной зависимости от контактного сопротивления R_n . Этот вывод явился основной предпосылкой для выбора марки применяемых щеток;

3) добавочный ток сильно зависит от параметра A , резко увеличиваясь при его снижении. Параметр A , оказывающий столь значительное влияние на качество коммутации МПТ, получил название постоянной коммутации;

4) при постоянной коммутации

$$A \leq 1 \quad (1.18)$$

плотность коммутируемая секция, в момент разрыва ее контура становится бесконечной. При этом теоретически бесконечным становится и напряжение разрыва U_p , вследствие чего безыскровая работа МПТ невозможна.

В дальнейшем некоторые допущения Е. Арнольда были уточнены, и развитая таким образом теория коммутации получила название *классической*.

Последователи Е. Арнольда прежде всего распространили механизм изменения тока посредством коммутации сопротивлением на общий случай многоламельного щеточного перекрытия. При этом прямолинейную коммутацию тока в пассивной секции (1.8) стали записывать в следующем виде:

$$i_n = i_a \left(1 - \frac{2t}{T} \right). \quad (1.19)$$

В формуле (1.19) теоретический период коммутации

$$T = \frac{b_p}{V_\kappa}, \quad (1.20)$$

где b_p – расчетная ширина щеточного контакта, т.е. расстояние, пройденное внешней окружностью коллектора за период коммутации

$$b_p = b_{щ} - b_u + \left(1 - \frac{a_n}{p} \right) \beta_\kappa + \Delta b = \gamma_p \beta_\kappa. \quad (1.21)$$

Здесь a_n – число пар параллельных ветвей якорной обмотки; p – число пар главных полюсов (ГП); β_κ – коллекторное деление; Δb – раздвижка щеток по длине коллектора; γ_p – расчетный коэффициент щеточного перекрытия.

Параметры β_κ и γ_p определяются следующими выражениями:

$$\beta_k = \frac{\pi D_k}{K} = b_l + b_u ; \quad (1.22)$$

$$\gamma_p = \frac{b_{\text{щ}} - b_u + \Delta b}{\beta_k} + 1 - \frac{a_n}{p} , \quad (1.23)$$

где D_k – диаметр коллектора; K – число коллекторных пластин.

Учитывая, что при многоламельном щеточном перекрытии изменяющиеся контактные сопротивления ламелей уже не присоединены к одной секции, а располагаются на краях щеточного контакта, система уравнений (1.6) Арнольда трансформировалась в одно дифференциальное уравнение

$$\Delta U_c - \Delta U_n = e_p - e_k = -L_p \frac{di}{dt} - e_k , \quad (1.24)$$

где ΔU_c и ΔU_n – падения напряжения на сбегавшем и набегавшем краях щетки; L_p – результирующая индуктивность короткозамкнутой секции с учетом ее взаимоиндуктивных связей с другими коммутируемыми секциями.

Значительный вклад в дальнейшее развитие классической теории коммутации внес Р. Рихтер [2, 9]. Основной его заслугой является разработка методики расчета E_p для случая многоламельного щеточного перекрытия и укладке в одном слое паза нескольких активных сторон секций, когда в состав реактивной ЭДС короткозамкнутой секции, помимо ее ЭДС самоиндукции, входят ЭДС взаимоиндукций с другими одновременно коммутируемыми секциями.

Что касается вопроса коммутации тока в пассивных секциях, то Р. Рихтер установил, что при прямолинейной коммутации секций простой волновой обмотки нарушается равномерное распределение плотности тока нагрузки под щеткой. Аналогичные нарушения происходят и при использовании многоходовых обмоток якоря.

В качестве оптимальной формы кривой тока коммутации Р. Рихтер предложил слегка ускоренный ее ход, когда выполняются следующие условия:

$$J_c = 0 \text{ и } \frac{di}{dt} = 0 \text{ при } t \rightarrow T. \quad (1.25)$$

Впоследствии классическая теория неоднократно подвергалась критике и пересмотру, так как опытные данные противоречили основной идее этой теории – механизму изменения тока в короткозамкнутой секции посредством коммутации сопротивлением:

во-первых, реальные свойства скользящего контакта не соответствовали представлениям классической теории;

во-вторых, когда контактная дуга щетки перекрывает несколько коллекторных пластин, то исчезает принятый в теории механизм изменения тока коммутации, так как «...здесь в течение значительной части периода коммутации, когда не происходит перераспределения площади контакта между набегающей и сбегаящей пластинами коммутируемой секции и щетками, коммутация сопротивлением переходного контакта совершенно невозможна. Тем не менее, и в случае, когда $b_{щ} > \beta_k$, классическая теория исходит из необоснованного представления о прямолинейной коммутации, имеющего логическое обоснование лишь для случая, когда $b_{щ} \leq \beta_k$ » [4].

Кроме того, уже через несколько лет после теоретических выводов Е. Арнольда у многих исследователей вызвали недоумение факты наличия МПТ, безупречно работающих в коммутационном отношении, у которых значение постоянной коммутации A было гораздо меньше единицы, что явно противоречило условию (1.18). Р. Рихтер пытался объяснить это несоответствие между теорией и практикой наличием небольшого скоса у сбегаящего края щетки [9].

1.2 Анализ теории среднелинейной коммутации

Вслед за классической теорией появился капитальный труд Л. Дрейфуса, посвященный вопросам коммутации в МПТ большой мощности [3]. В нем более детально, чем в классической теории, анализируется характерный для этих машин случай многоламельного щеточного перекрытия и делается важный вывод о том, что в крупных МПТ средняя скорость изменения тока коммутации во всех короткозамкнутых секциях якорной обмотки не зависит от ширины щетки и определяется только линейной нагрузкой якоря A_a и его окружной скоростью вращения V_a

$$\left(\frac{d \sum i}{dt} \right)_{cp} = 2A_a V_a. \quad (1.26)$$

Рассматривая процесс коммутации тока в каждой активной стороне секций одного паза якоря, Л. Дрейфус приходит к заключению, что для средней скорости изменения пазового тока справедливо следующее выражение:

$$\left(\frac{dI_n}{dt} \right)_{\bar{n}\delta} = \left(\sum_{k=1}^{2u_{\bar{e}}} \frac{di_k}{dt} \right)_{\bar{n}\delta} = \frac{4i_a u_{\bar{e}}}{T_n} = \frac{4i_a}{t_{\bar{e}}} = 2A_a V_a, \quad (1.27)$$

где I_n – пазовый ток; u_k – число коллекторных пластин, приходящихся на паз якоря; T_n – пазовый период коммутации, т.е. длительность короткого замыкания всех активных сторон секций паза; t_k – коллекторный период, т.е. время, в течение которого рабочая поверхность коллектора перемещается относительно щетки на одно коллекторное деление.

Следовательно, с учетом (1.26) и (1.27) средняя скорость изменения тока паза в зоне коммутации размещенных в нем активных сторон секций равна

средней скорости изменения тока коммутации во всех короткозамкнутых секциях якорной обмотки. Этот вид группового изменения тока короткозамкнутых секций Л. Дрейфус назвал *среднепрямолинейной* коммутацией.

Отрицая при многоламельном щеточном перекрытии механизм коммутации сопротивлением, Л. Дрейфус считает, что на характер изменения тока коммутации секций могут влиять только индуктированные в них ЭДС, а активные сопротивления коммутируемого контура, в том числе и контактные сопротивления ламелей коллектора, не играют в этом процессе существенной роли.

Рассматривая уравнение (1.24) классической теории, он предложил исключить из него разность падений напряжения на краях щеточного контакта $\Delta U_c - \Delta U_n$, ссылаясь на то, что в крупных МПТ, работающих без искрения, она мала и не превышает (0,1–0,3) В, в то время как значения ЭДС e_p и e_k могут достигать (8–10) В. Поэтому исходное уравнение своей теории Дрейфус представил в следующем виде:

$$-L_p \frac{di}{dt} - e_k = 0. \quad (1.28)$$

При равномерном зазоре под наконечником ДП ($e_k = E_k = \text{const}$) дифференциальное уравнение (1.28) решается путем его интегрирования по частям

$$i = i_a - \frac{E_k t}{L_p}. \quad (1.29)$$

Условие оптимальной коммутации (1.17) теории Е. Арнольда для случая многоламельного щеточного перекрытия Л. Дрейфус представил в следующем виде:

$$E_{\kappa} = L_p \frac{2i_a}{T}, \quad (1.30)$$

Подставляя значение E_{κ} из (1.30) в формулу (1.29) Л. Дрейфус получил прямолинейный закон классической теории (1.19). По его мнению, выражение (1.29) доказывает, что ток в короткозамкнутой секции при многоламельном щеточном перекрытии изменяется не посредством коммутации сопротивлением, а под влиянием индуктированной в ней ЭДС вращения от поля ДП.

Последующая критика теории среднепрямолинейной коммутации заключалась в том, что исходное уравнение (1.28) этой теории не содержит параметры скользящего контакта, т.е. в ней практически игнорируется установленная практикой активная роль щеток в процессе коммутации тока [4, 7].

Однако теория Л. Дрейфуса широко используется в современной теории МПТ, где процесс коммутации тока в короткозамкнутых секциях отождествляется с коммутацией тока в полупроводниковых выпрямительных установках, в которых за этот процесс, так же как и коммутирующая ЭДС от поля ДП, ответственна ЭДС, индуктированная во вторичной обмотке выпрямительного трансформатора [10].

1.3 Анализ теории оптимальной коммутации

Теория *оптимальной* коммутации, разработанная под руководством М.Ф. Карасева, является логическим продолжением теории Е. Арнольда с учетом электрических свойств скользящего контакта и экспериментально установленных фактов многолетней практики по снятию области безыскровой работы (ОБР) МПТ различной мощности [7, 8].

Основная идея теории оптимальной коммутации состоит в том, что входящие в третье уравнение системы (1.6) Арнольда падения напряжения в

контактных сопротивлений $i_c R_c$ и $i_n R_n$ аппроксимируются функциональными зависимостями от плотности тока, близкими к реальной ВАХ скользящего контакта.

По мнению авторов этой теории, при оптимальной – нормально ускоренной коммутации, когда выполняются условия (1.25) Р. Рихтера, пониженной плотностью тока нагружен сбегающий край щетки и ему соответствует начальный линейный участок вольтамперной характеристики (ВАХ) скользящего контакта (рисунок 1.5), для которого справедлива зависимость вида $\Delta U = r_k J$, где $r_k = \text{const}$. Следовательно, падение напряжения в контактом сопротивлении сбегающей ламели можно аппроксимировать зависимостью, получаемой из уравнений Е. Арнольда (1.5) и (1.6)

$$i_c R_c = (i + i_a) \frac{R_l}{1 - \tau_l} = \Delta U_c. \quad (1.31)$$

Для нагруженного повышенной плотностью тока набегающего края щетки, где падение напряжения (рисунок 1.5) практически не зависит от плотности тока, справедлива зависимость вида $\Delta U_n = \text{const}$.

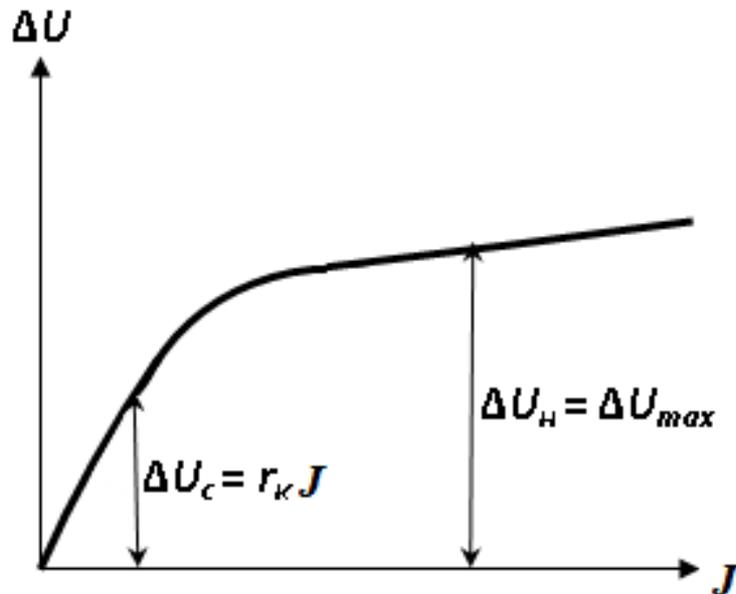


Рис. 1.5. Аппроксимация падений напряжения на краях щетки

Тогда для падения напряжения в контактном сопротивлении набегающей ламели можно записать

$$i_n R_n = \Delta U_n = \text{const.} \quad (1.32)$$

С учетом выражений (1.31) и (1.32) третье уравнение системы (1.6) Е. Арнольда в теории оптимальной коммутации трансформируется в следующий вид:

$$(i + i_a) \frac{R_l}{1 - \tau_l} - \Delta U_n = -L \frac{di}{dt} - e_\kappa. \quad (1.33)$$

По мнению авторов этой теории, их исходное уравнение (1.33) имеет перед уравнениями Е. Арнольда (1.6) следующие преимущества:

во-первых, сокращено число уравнений с трех до одного;

во-вторых, это уравнение довольно точно учитывает реальную ВАХ скользящего контакта угольных щеток с медным коллектором;

в-третьих, при $e_\kappa = E_\kappa$ дифференциальное уравнение (1.33), в отличие от интегрального уравнения (1.14), имеет аналитические решения, не содержащие бесконечность:

при $A = 1$

$$i = i_a (1 - 2\tau_l) + \frac{E_\kappa - \Delta U_n}{R_l} (1 - \tau_l) \ln(1 - \tau_l) = i_n + i_\delta; \quad (1.34)$$

при $A \neq 1$

$$i = i_a (1 - 2\tau_l) + \left[2i_a - \frac{A(E_\kappa - \Delta U_n)}{R_l (A - 1)} \right] (1 - \tau_l) [1 - (1 - \tau_l)^{A-1}] = i_n + i_\delta; \quad (1.35)$$

в-четвертых, на коммутацию тока оказывает влияние так называемая дополнительная коммутирующая ЭДС

$$E_{\delta} = \Delta U_c - \Delta U_n = (i + i_a) \frac{R_n}{1 - \tau_n} - \Delta U_n < 0, \quad (1.36)$$

которая характеризует активную роль щеточного контакта в этом процессе.

Основной опытный материал, подтверждающий теорию оптимальной коммутации, ее авторы видят в следующих экспериментально установленных фактах многолетней практики по снятию ОБР МПТ различной мощности:

1 В нормально ускоренном характере изменения тока коммутации при его осциллографировании для средней линии ОБР при опытах подпитки током обмотки добавочных полюсов (ДП).

Этот факт свидетельствует об оптимальности нормально ускоренной коммутации.

2 В ускорении коммутации тока с увеличением нагрузки машины (при постоянной частоте вращения якоря и отсутствии насыщения магнитной системы ДП).

Как видно из уравнения (1.33), оптимальному значению коммутирующей ЭДС $e_{ко}$ соответствует следующее выражение:

$$e_{ко} = e_{po} + \Delta U_n - (i + i_{ao}) \frac{R_n}{1 - \tau_n} = e_{po} + \Delta U_n - \Delta U_{co}, \quad (1.37)$$

где e_{po} и ΔU_{co} – реактивная ЭДС и падение напряжения в сбегавшей части щетки при токе нагрузки в параллельной ветви якорной обмотки i_{ao} , соответствующем оптимальной настройке ДП.

Так как с увеличением нагрузки выше i_{ao} пропорционально возрастают и значения параметров e_{κ} , e_p и ΔU_c , а падение напряжения в набегающем крае щетки остается на прежнем уровне, то в коммутируемом контуре возникает ЭДС небаланса

$$\Delta e = e_{\kappa} - (e_p + \Delta U_n - \Delta U_c) > 0,$$

имеющее знак ЭДС e_k , и скорость изменения тока коммутации в секции возрастает.

3 В ускорении коммутации тока с ростом частоты вращения якоря.

Этот эффект в теории оптимальной коммутации также объясняется при помощи уравнения (1.37), которое с учетом (1.36) можно записать в следующем виде:

$$e_{ko} = e_{po} - E_{do}. \quad (1.38)$$

Учитывая, что ЭДС e_k и e_p пропорциональны частоте вращения якоря, а дополнительная коммутирующая ЭДС E_d , если пренебречь механическими факторами, не зависит от нее, то при увеличении частоты вращения якоря в n раз из (1.38) имеем

$$ne_{ko} > ne_{po} - E_{do},$$

то есть ускорение процесса изменения тока коммутации в секции.

В настоящее время считается, что теория оптимальной коммутации ближе к действительности, чем другие теории, описывает коммутационные процессы, так как наиболее полно учитывает электрические свойства щеточного контакта и его активную роль в этом процессе.

Сравнение выражений (1.7)–(1.9) теории Е. Арнольда с формулами (1.34) и (1.35) теории оптимальной коммутации показывает, что они одинаково описывают процесс изменения тока в короткозамкнутой секции посредством коммутации сопротивлением, но в них различен подход в определении добавочного тока. Главное достоинство этих теорий заключается в том, что в рамках принятых в них допущений они довольно точно описывают процесс коммутации тока при одноламельном щеточном перекрытии и дают конкретные рекомендации по улучшению качества коммутации МПТ, правильность которых подтверждена многолетней практикой их эксплуатации.

Однако принятый в этих теориях механизм изменения тока в короткозамкнутой секции посредством коммутации сопротивлением нельзя распространить на практически важный случай многоламельного щеточного перекрытия, когда пластины коллектора, к которым присоединена эта секция, большую часть ее периода коммутации остаются полностью перекрытыми щеткой, их контактные сопротивления не изменяются, и механизм коммутации сопротивлением теряет свой физический смысл [4].

В теории среднепрямолинейной коммутации Л. Дрейфуса, отрицающего механизм коммутации сопротивлением при многоламельном щеточном перекрытии, за изменение тока в короткозамкнутой секции ответственны ДП, индуцирующие в ней ЭДС вращения e_k . Чтобы ясно понять всю несостоятельность этой гипотезы, достаточно рассмотреть два практически осуществимых режима работы МПТ:

1 Режим, при котором питаются током только обмотки ДП, а якорь обесточен и вращается от вспомогательного двигателя ($e_k \neq 0$ и $e_p = 0$).

Согласно уравнениям (1.29) и (1.30) Л. Дрейфуса ток в короткозамкнутой секции при обесточенной обмотке якоря должен под влиянием коммутирующей ЭДС e_k изменяться от нуля до $-2i_a$, но в действительности через эту секцию протекает ток колоколообразной формы (осциллограммы этого тока приведены в [4] для доказательства отсутствия в щеточном контакте «ионных тропинок» И. Нейкирхена).

2 Режим с малой скоростью вращения якоря ($e_k \approx 0$ и $e_p \approx 0$).

В соответствии с уравнением (1.29) Л. Дрейфуса при $E_k = 0$ ток в короткозамкнутой секции не реверсирует, т.е. в теории среднепрямолинейной коммутации при отсутствии ЭДС e_k механизм изменения тока коммутации теряет физический смысл.

В действительности кривая тока коммутации в пассивной секции i_n при многоламельном щеточном перекрытии (рисунок 1.6) близка по очертанию к прямолинейному закону, но коммутация сопротивлением отсутствует, так

как контактное сопротивление ламели $\Delta U_{л} / i_{л}$, к которой присоединена секция, большую часть ее короткого замыкания практически не меняется [22].

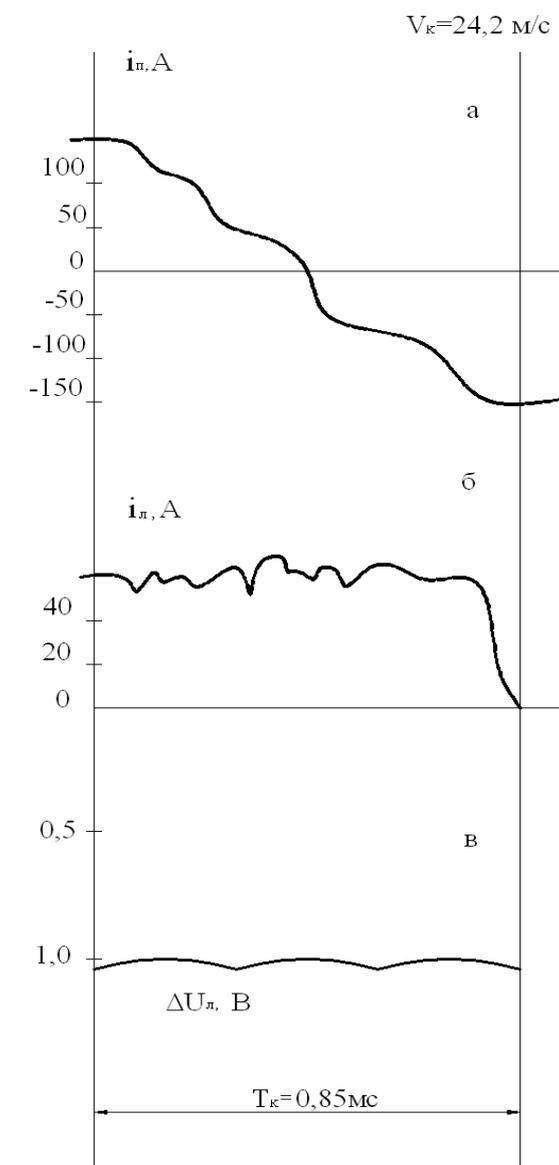


Рисунок 1.6. Осциллограммы: а – ток секции; б – ток через ламель; в – падение напряжения в ламели коллектора.

Гипотеза о решающей роли ДП в процессе изменения тока коммутации теоретически связана с неверной трактовкой третьего уравнения системы (1.6), которое при многоламельном щеточном перекрытии трансформирова-

лось в уравнение (1.24). При своем анализе этого уравнения Л. Дрейфус допустил неточность, так как в правой части уравнения (1.24) находится не сумма значений ЭДС e_p и e_k , а их разность, которая может быть сколь угодно мала (в достижении последнего условия, собственно говоря, и заключается одна из главных проблем коммутации МПТ). Исключив из уравнения (1.24) падения напряжения на краях щеточного контакта, он автоматически получил условие пассивности короткозамкнутой секции (1.13) теории Е. Арнольда, из которого вытекает прямолинейная коммутация тока (1.8) [22].

Следует также отметить, что принятый в теории Л. Дрейфуса средне-прямолинейный закон изменения полного тока паза (1.27) не учитывает одновременной коммутации тока в секциях соседних пазов. Для средней скорости изменения пазового тока в зоне коммутации расположенных в нем активных сторон секций можно записать

$$\left(\frac{dI_n}{dt} \right)_{cp} = \frac{I_n V_a}{b_{зк}} = 2A_a V_a \frac{u_k}{\gamma_p + u_k - 1 + \varepsilon_k}. \quad (1.39)$$

Здесь $b_{зк}$ – ширина зоны коммутации

$$b_{зк} = \beta_k \frac{D_a}{D_k} (\gamma_p + u_k - 1 + \varepsilon_k), \quad (1.40)$$

где D_a – диаметр якоря; ε_k – коэффициент укорочения якорной обмотки.

Как видно из формулы (1.39), средняя скорость изменения суммарного тока паза зависит от ширины щетки и параметров якорной обмотки.

Главное достоинство теории Л. Дрейфуса заключается в исследовании коммутирующей способности разных модификаций якорных обмоток и их чувствительности к различным коммутационным нарушениям [11]. При этом им даны практические рекомендации по коммутирующим свойствам якорных обмоток, по их чувствительности к величине и распределению поля ДП,

а также о роли в коммутационном процессе уравнивающих соединений. Особенно ценным является предложение Л. Дрейфуса производить настройку ДП крупных МПТ на обеспечение качественной коммутации секций, заканчивающих коммутацию пазового тока.

Выводы по главе 1

На основе приведенного анализа существующих теорий коммутации можно сделать вывод о том, что ее математический аппарат развит только для варианта, когда контакт щетки осуществляется только с одной пластиной коллектора (одноламельное щеточное перекрытие). Однако на практике щетка перекрывает несколько ламелей коллектора и в этом случае имеется возможность формирования щеточного контакта, позволяющего улучшить коммутационный процесс.

ГЛАВА 2 ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА КОММУТАЦИИ

2.1 Физическая сущность процесса изменения тока в коммутируемых секциях якоря

Физическая сущность процесса реверса тока коммутации в общем случае, когда щетка перекрывает несколько пластин коллектора, наиболее наглядно проявляется при отсутствии в короткозамкнутых секциях каких-либо ЭДС. Практически это осуществимо при очень малой индуктивности этих секций и отсутствии в зоне их коммутации внешних полей, либо при низкой скорости вращения якоря.

Предположим, что к коллектору, который вращается с пренебрежительно малой окружной скоростью, присоединена простая петлевая обмотка, и через щетку, перекрывающую пять коллекторных делений, протекает постоянный ток нагрузки I (рисунок 2.1).

В этом случае короткозамкнутые секции можно считать пассивными и для момента времени, при расположении элементов (рисунок 1), для токов коммутации этих секций на основании первого закона Кирхгофа можно записать

$$\left. \begin{aligned} i_{n1} &= 0,5I; \\ i_{n2} &= i_{n1} - i_{\epsilon1} = 0,5I - i_{\epsilon1}; \\ i_{n3} &= i_{n2} - i_{\epsilon2} = 0,5I - i_{\epsilon1} - i_{\epsilon2}; \\ i_{n4} &= i_{n3} - i_{\epsilon3} = 0,5I - i_{\epsilon1} - i_{\epsilon2} - i_{\epsilon3}; \\ i_{n5} &= i_{n4} - i_{\epsilon4} = 0,5I - i_{\epsilon1} - i_{\epsilon2} - i_{\epsilon3} - i_{\epsilon4}; \\ i_{n6} &= i_{n5} - i_{\epsilon5} = 0,5I - i_{\epsilon1} - i_{\epsilon2} - i_{\epsilon3} - i_{\epsilon4} - i_{\epsilon5} = 0,5I - I = -0,5I, \end{aligned} \right\} (2.1)$$

где $i_{n1}, i_{n2}, i_{n3}, i_{n4}, i_{n5}$ и i_{n6} – токи коммутации в пассивных секциях; $i_{\epsilon1}, i_{\epsilon2}, i_{\epsilon3}, i_{\epsilon4}$ и $i_{\epsilon5}$ – составляющие тока нагрузки I , протекающие через ламели коллектора, к которым подключены короткозамкнутые секции.

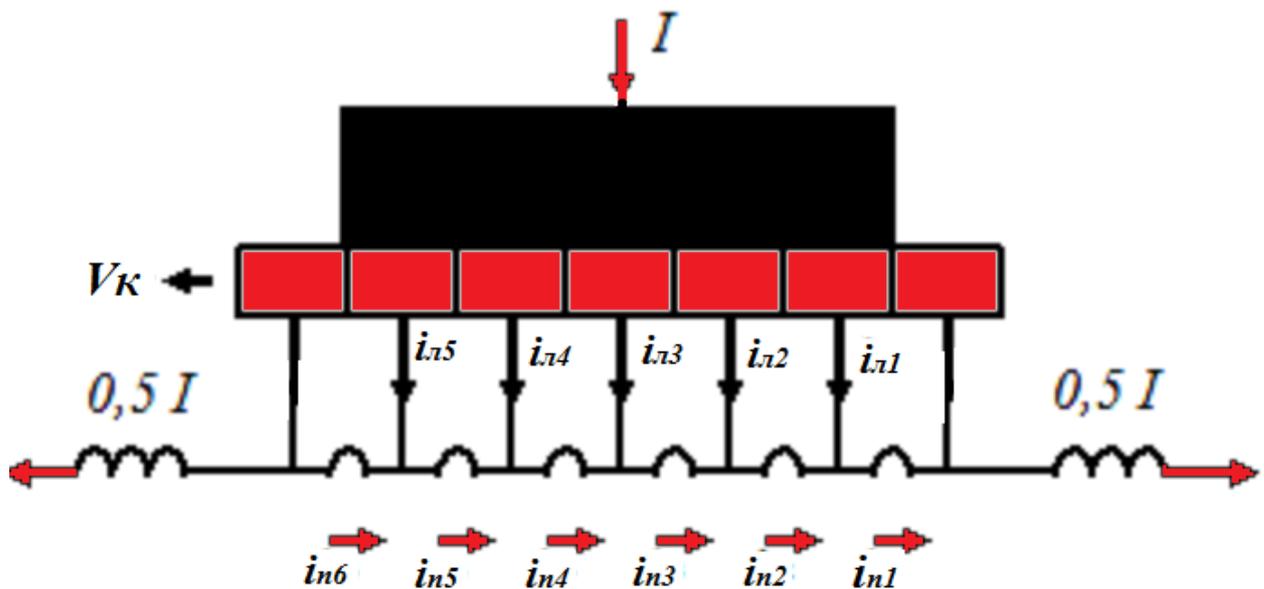


Рисунок 2.1. Коммутация тока якоря в пассивной секции

Как видно из рисунок 2.1 и системы уравнений (2.1), при медленном вращении коллектора ток в секции, вступающей в короткое замыкание, при каждом перемещении ламелей коллектора, с которыми она соединена, на одно коллекторное деление поочередно будет принимать значения i_{n2} , i_{n3} , i_{n4} , i_{n5} и $i_{n6} = -0,5I$, т.е. будет изменяться от первоначального значения $i_{n1} = 0,5I$ до своего конечного значения $i_{n6} = -0,5I$ под влиянием протекающего через ламели коллектора тока нагрузки при их движении относительно щетки.

Систему уравнений (2.1) можно представить в следующем виде:

$$i_{n(k+1)} = 0,5I - \sum_{k=1}^{\gamma} i_{лk} . \quad (2.2)$$

где $k = 0, 1, \dots, \gamma$; $\gamma = \gamma_p - \varepsilon$ ($\varepsilon < 1$) – число полностью перекрытых щеткой коллекторных пластин.

Однако формула (2.2) описывает лишь стационарное состояние токо-съемного узла коллектор-щеткой при неподвижном коллекторе.

Если через x (рисунок 2.2) обозначить расстояние на контактной дуге щетки, пройденное коллекторными пластинами, с которыми соединена рас-

смаатриваемая секция, от начала ее короткого замыкания (это расстояние будем называть коммутационным путем секции), то в случае простой петлевой обмотки для тока коммутации пассивной секции, прошедшей коммутационный путь x , с учетом (2.2) можно записать

$$i_n(x) = 0,5I - I(x), \quad (2.3)$$

где $I(x)$ – ток нагрузки, протекающий через участок контактной дуги щетки, равный коммутационному пути секции x .

Вид формулы (2.3) позволяет представить изменение тока в короткозамкнутой секции как непрерывное влияние на этот процесс тока нагрузки $I(x)$ на протяжении всего ее коммутационного пути x . При этом ток $I(x)$ изменяется от нуля до I . Следовательно, физическую сущность процесса изменения тока при многоламельном щеточном перекрытии можно сформулировать следующим образом: ток в короткозамкнутой секции изменяется под влиянием протекающего через скользящий контакт тока нагрузки. В обесточенном или неподвижном щеточном контакте МПТ этот процесс отсутствует.

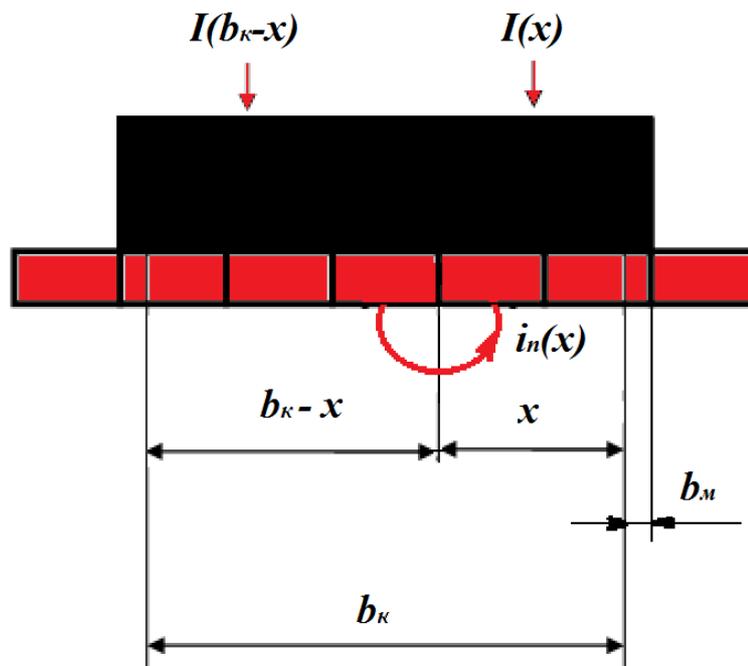


Рисунок 2.2. Коммутационный путь секции

Из рисунка 2.2 имеем

$$I = I(x) + I(b_k - x), \quad (2.4)$$

где b_k – полный коммутационный путь секции. При учете реальных свойств скользящего контакта в случае простой петлевой обмотки якоря и обычной конструкции щеток b_k равен длине их контактной дуги.

Подставляя значение тока нагрузки I из (2.4) в уравнение (2.3), получим

$$i_n(x) = 0,5[I(b_k - x) - I(x)]. \quad (2.5)$$

Если через $i_{щ}$ обозначить мгновенное значение тока нагрузки, протекающего через скользящий контакт, то на основании (2.3) и (2.5) можно записать

$$i_n(x) = 0,5i_{щ} - i_{щ}(x) = 0,5[i_{щ}(b_k - x) - i_{щ}(x)]. \quad (2.6)$$

Следовательно, мгновенное значение тока коммутации пассивной секции однозначно определяется мгновенным положением ее коллекторных пластин на контактной дуге щетки и мгновенным распределением в ней протекающего через скользящий контакт тока нагрузки.

Формула (2.6) является уравнением коммутации тока в пассивных секциях в общем случае, потому что описывает непрерывный процесс изменения их тока при любом щеточном перекрытии и справедлива для любого режима работы коллекторной машины, так как параметры $i_{щ}$ и x могут иметь сколь угодно сложную временную зависимость. Но в любом случае в момент окончания короткого замыкания секции ($x = b_k$) выполняются следующие условия:

$$i_{щ}(b_k) = i_{щ} \text{ и } i_n(b_k) = -0,5i_{щ}, \quad (2.7)$$

т.е. ток коммутации пассивной секции в момент окончания ее короткого замыкания автоматически принимает значение тока параллельной ветви, в которую она переключается.

На практике, в основном из-за механических факторов, реальная длина контактной дуги щетки b_k может быть заметно меньше ее расчетной ширины b_p . Из этого факта некоторые ученые О.Г. Вегнер и др. сделали очень важный вывод о том, что рациональная кривая тока коммутации секции должна в конце переходного процесса иметь пологий участок с малым током, показанная на рисунке 2.3, чтобы в конце периода замыкания секции T не разрывался бы значительный ток, который создает интенсивное искрение под сбегающим краем щетки.

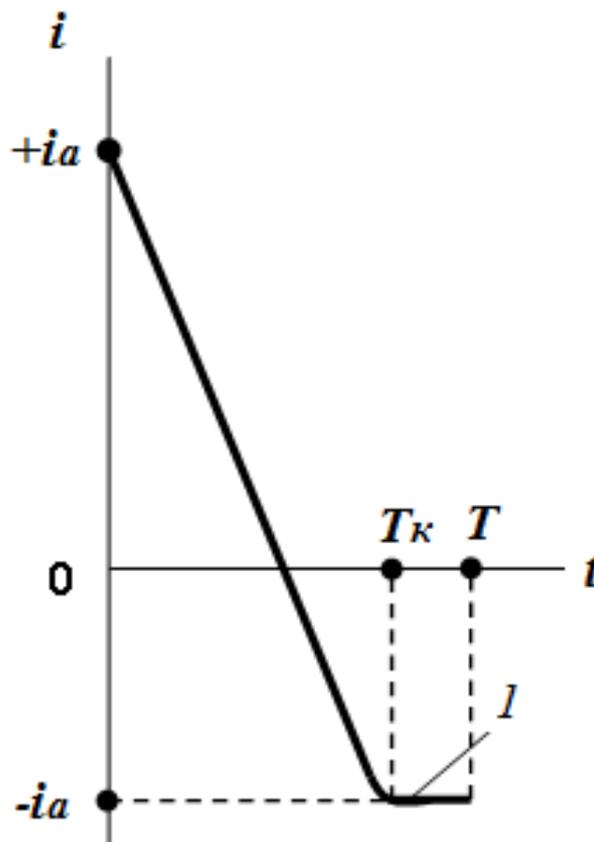


Рисунок 2.3. Коммутация ТЭД с пологим участком (1) в конце цикла коммутации

Но из уравнения (2.6) с очевидностью вытекает, что если секция пассивна на протяжении всего ее действительного периода коммутации

$$T_{\kappa} = \frac{b_{\kappa}}{V_{\kappa}}, \quad (2.8)$$

то даже при очень заметной разнице между b_p и b_{κ} в момент окончания ее короткого замыкания выполняются условия (2.7). В этом случае лишь увеличивается скорость изменения тока, но в момент разрыва контура секции ток в ней автоматически принимает значение тока параллельной ветви, в которую она переключается.

Если плотность тока нагрузки распределена в щеточном контакте равномерно, то

$$i_{\dot{u}}(x) = i_{\dot{u}} \frac{x}{b_{\dot{e}}}. \quad (2.9)$$

При равномерном вращении коллектора для коммутационного пути секции можно записать

$$x = V_{\kappa} t. \quad (2.10)$$

Тогда с учетом (2.8)–(2.10) уравнение (2.6) можно представить в виде следующей временной зависимости:

$$i_n(t) = 0,5i_{\dot{u}} \left(1 - \frac{2t}{T_{\kappa}} \right). \quad (2.11)$$

Если $i_{\dot{u}} = I = 2i_a$ и $T_{\kappa} = T$, то выражение (2.11) примет вид уравнения (1.19). Следовательно, классическая прямолинейная коммутация является ча-

стным случаем общего уравнения коммутации тока в пассивной секции (2.6) при выполнении следующих условий [23]:

- при равенстве контактной дуги щетки ее расчетной ширине;
- при равномерном распределении плотности тока под щеткой;
- при постоянстве режима работы МПТ.

2.2 Зависимость коммутации тока от параметров щеток

Если через $j(x)$ обозначить мгновенное распределение плотности тока нагрузки на контактной дуге щетки, то для тока через ее элементарную площадку $l_{щ} dx$, расположенную на расстоянии x (рисунок 2.4), можно записать

$$di_{щ}(x) = j(x)l_{щ} dx, \quad (2.12)$$

где $l_{щ}$ – длина щетки.

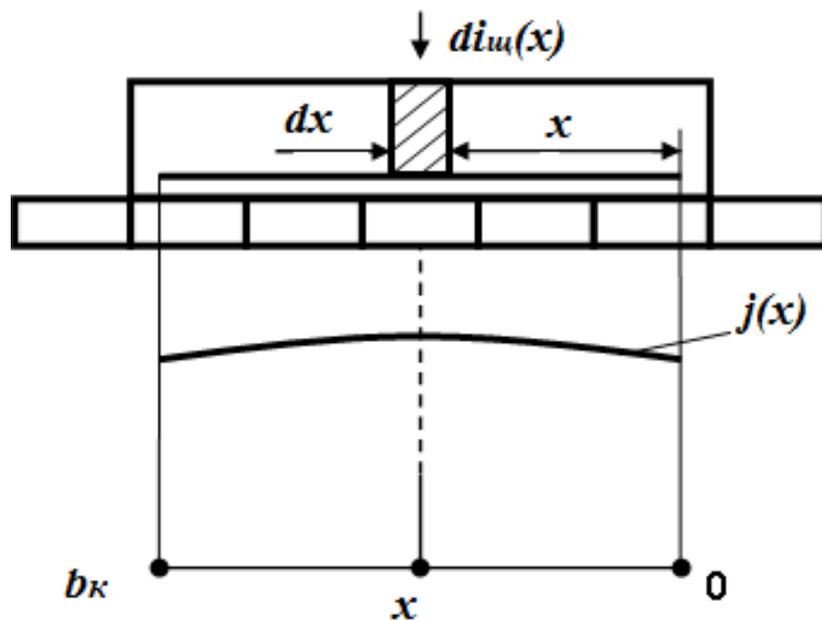


Рисунок 2.4. Ток нагрузки через элементарную площадку щетки

Проинтегрировав формулу (2.2) для различных пределов интегрирования, имеем

$$i_{щ} = i_{щ}(b_{\kappa}) = l_{щ} \int_0^{b_{\kappa}} j(x) dx ; \quad (2.13)$$

$$i_{щ}(b_{\kappa} - x) = l_{щ} \int_x^{b_{\kappa}} j(x) dx ; \quad (2.14)$$

$$i_{щ}(x) = l_{щ} \int_0^x j(x) dx . \quad (2.15)$$

Подставляя значения токов $i_{щ}$, $i_{щ}(b_{\kappa} - x)$ и $i_{щ}(x)$ из (2.13)–(2.15) в уравнение (2.6), получим следующее интегральное уравнение:

$$i_n(x) = 0,5l_{щ} \int_0^{b_{\kappa}} j(x) dx - l_{щ} \int_0^x j(x) dx = 0,5l_{щ} \left[\int_x^{b_{\kappa}} j(x) dx - \int_0^x j(x) dx \right] . \quad (2.16)$$

Из уравнения (2.16) вытекает важный для практики вывод о том, что путем целенаправленного изменения распределения плотности тока нагрузки по контактной дуге щетки можно управлять током коммутации секций.

Для проверки точности полученного уравнения требуется рассчитать по (2.6) кривую $i_n(x)$ для реального распределения $j(x)$ и сравнить ее с экспериментальной кривой тока коммутации секции.

Снятие опытной кривой $i_n(x)$ при многоламельном щеточном перекрытии производилось на специальной установке (рисунок 2.5), состоящей из коллектора 1, приводимого во вращение вспомогательным двигателем 2.

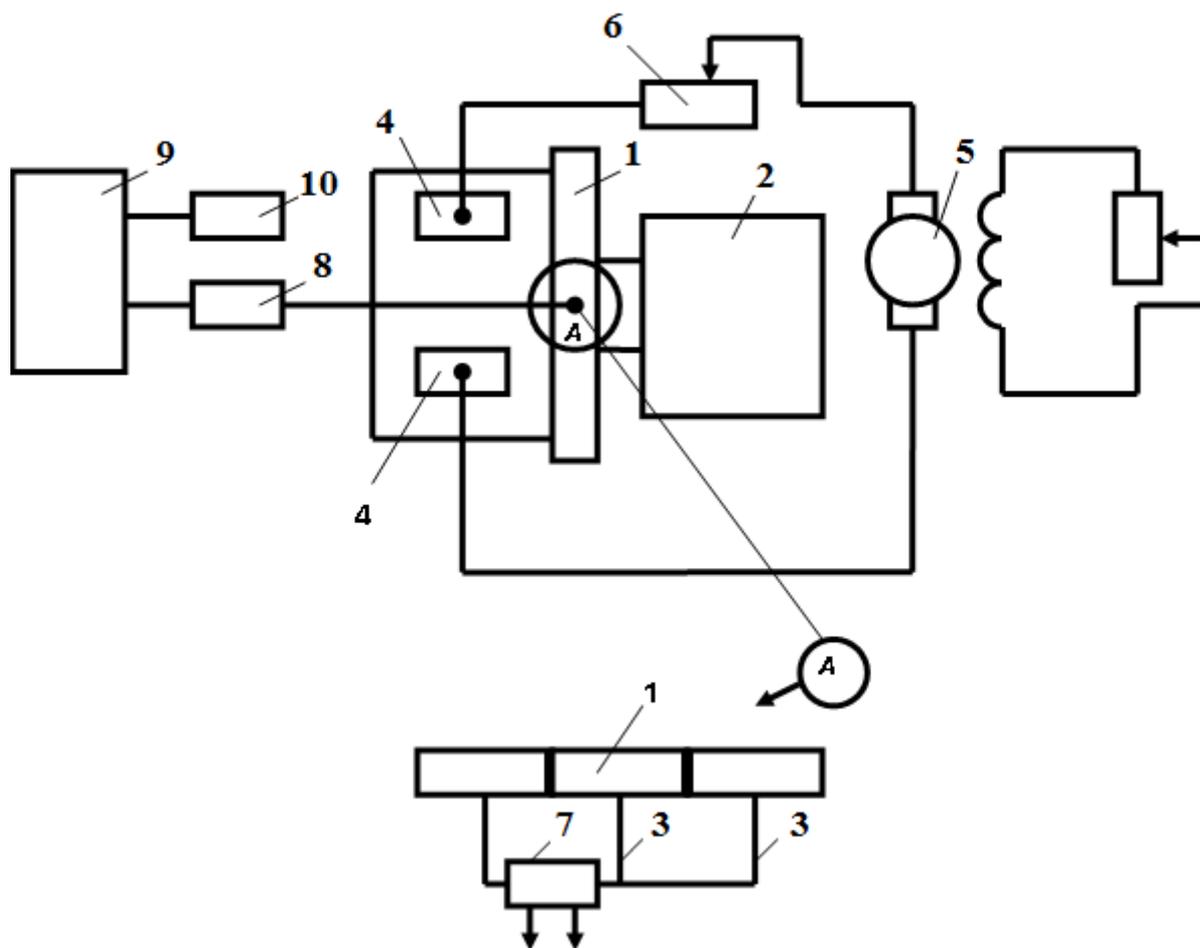


Рисунок 2.5. Коллекторная установка

Вместо секций простой петлевой обмотки якоря к коллекторным пластинам были присоединены медные перемычки 3 (рисунок 2.5), имеющие пренебрежительно малое активное сопротивление и индуктивность. Питание щеток 4, перекрывающих пять коллекторных делений, осуществлялось от низковольтного генератора постоянного тока 5 через балластное сопротивление 6. Падение напряжения на манганитовом шунте 7, пропорциональное току через перемычку 3, подавалось при помощи специальной контактной муфты 8 к электронному осциллографу 9, запуск ждущей развертки которого осуществлялся от поворотного фотоэлектрического датчика 10.

Усредненная кривая тока через перемычку 3, полученная после обработки большого числа осциллограмм (рисунок 1.6), приведена на рисунке

2.6. Без учета некоторого снижения скорости изменения тока в начале и в конце опытной кривой $i_n(x)$ она близка по очертанию к прямолинейной коммутации тока классической теории.

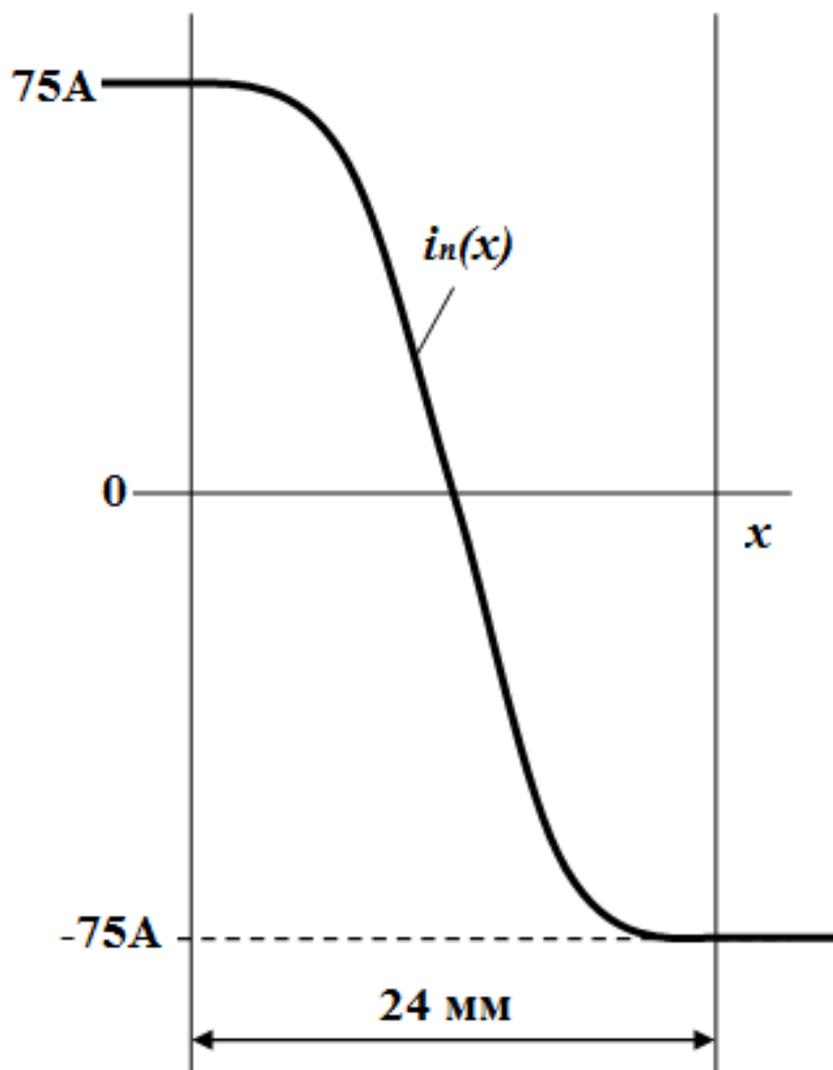


Рисунок 2.6. Опытная кривая тока в переключателе

На той же установке было снято реальное распределение плотности тока вдоль контактной дуги щетки, которая была разделена на пять изолированных друг от друга и щеткодержателя элементов 1 (рисунок 2.7), каждый из которых подключался через отдельный электронный преобразователь 2 к источнику постоянного тока.

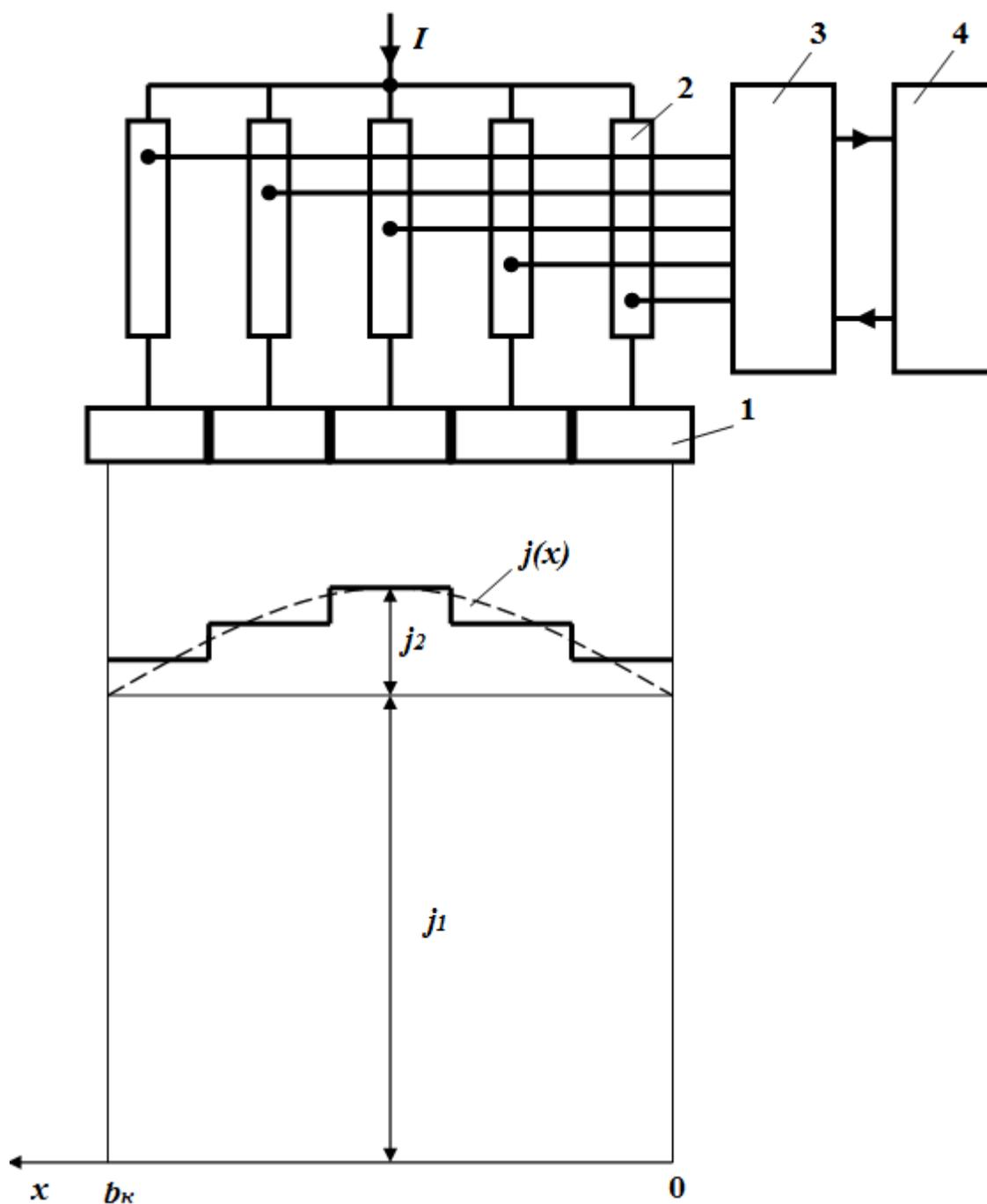


Рисунок 2.7. Распределение по ширине щетки плотности тока нагрузки

Унифицированные выходные сигналы от преобразователей 2, пропорциональные токам через элементы 1 щеток, подавались на коммутатор 3 измерительного комплекса 4, который через заданный интервал времени обеспечивал печать измеренных значений токов через элементы 1. Влияние на результаты замеров разброса значений тока, связанного с различием контакт-

ных сопротивлений ламелей, усреднялось большим объемом измерений, при которых элементы щеток поочередно контактировали практически со всеми ламелями коллектора.

Плотность тока определялась путем деления усредненного значения тока через каждый элемент щетки на его рабочую площадь. При этом для крайних элементов щетки учитывалась реальная ширина ее контактной дуги.

Приведенная на рисунке 2.7 гистограмма усредненного распределения плотности тока нагрузки под щеткой, если не учитывать некоторую неравномерность этого распределения и различие между $b_{щ}$ и b_k , согласуется с представлениями классической теории о том, что в среднем скользящий контакт непрерывен. По результатам экспериментальных исследований аналогичный вывод был сделан в [12]: «... несмотря на то, что ток в скользящем контакте проходит по весьма малым по размеру и хаотически разбросанным по поверхности щетки «островкам», непрерывно меняющим свое местоположение, усредненное значение плотности тока под щеткой будет иметь примерно одинаковое значение для всей ее поверхности, поэтому, если не рассматривать физическую сущность прохождения тока через контакт, усредненное понятие о непрерывном характере контакта «щетка – коллектор» не должно приводить к существенным математическим погрешностям при расчете».

Усредненная кривая реального распределения плотности тока $j_{щ}(x)$, изображенная на рисунке 2.7 пунктирной линией, достаточно точно аппроксимируется следующей функцией:

$$j(x) = J_1 + J_2 \sin(\pi x/b_k) , \quad (2.17)$$

где J_1 – постоянная составляющая плотности тока в скользящем контакте; J_2 – амплитуда переменной составляющей плотности тока под щеткой.

Подставляя значение функции $j(x)$ из (2.17) в уравнение (2.16) и учитывая, что $i_{щ} = I = \text{const}$, после интегрирования получим

$$i_n(x) = 0,5I - l_{щ} \left[J_1 x + \frac{J_2 b_k}{\pi} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{b_k} \right) \right]. \quad (2.18)$$

Для средней плотности тока под щеткой можно записать

$$J = \frac{I}{l_{щ} b_k} = J_1 + \frac{2}{\pi} J_2. \quad (2.19)$$

После постановки J_1 из (2.19) в уравнение (2.18) окончательно имеем

$$i_i(x) = 0,5I \left(1 - \frac{2x}{b_{\hat{e}}} \right) - \frac{J_2 l_{щ}}{\pi} \left[2x - b_{\hat{e}} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{b_{\hat{e}}} \right) \right]. \quad (2.20)$$

Первый член правой части уравнения (2.20) описывает коммутацию тока в пассивной секции при равномерном распределении средней плотности тока под щеткой, а второй член характеризует влияние на этот процесс неравномерности этого распределения, причем при $x = 0$ и $x = b_k$ второй член обращается в нуль.

На рисунке 2.8 приведена кривая тока коммутации, построенная по уравнению (2.60) для опытного распределения $j(x)$, изображенного на рисунке 2.7. Очертание расчетной кривой $i_n(x)$ на рисунке 2.8 практически совпадает с формой опытной кривой тока, приведенной на рисунке 2.6.

При $V_k = \text{const}$ с учетом (2.8) и (2.10) уравнение (2.20) можно представить в виде временной зависимости

$$i_n(t) = 0,5I \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right) + \frac{J_2 l_{щ} V_k}{\pi} \left[2t - T_k \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T_k} \right) \right]. \quad (2.21)$$

Продифференцировав (2.21) по времени, получим

$$\frac{di_n}{dt}(t) = -\frac{I}{T_k} + \frac{J_2 l_{щ} V_k}{\pi} \left(2 - \pi \sin \frac{\pi t}{T_k} \right). \quad (2.22)$$

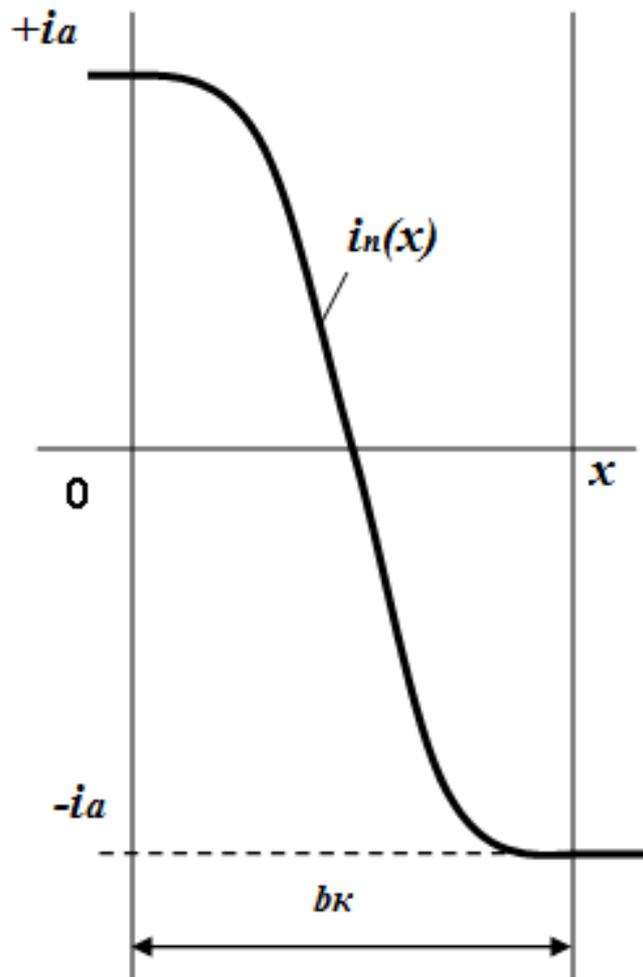


Рисунок 2.8. Расчетная кривая тока коммутации

Для средней скорости изменения тока коммутации секции с учетом (2.22) имеем

$$\left(\frac{di_n}{dt}\right)_{cp} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_\delta} \frac{di_n}{dt}(t) dt = -\frac{I}{T_k}. \quad (2.23)$$

Следовательно, при реальном распределении плотности тока под щеткой средняя скорость изменения тока коммутации секции остается такой же, как и при равномерном ее распределении.

Учитывая, что среднее значение переменной составляющей плотности тока нагрузки $2J_2 / \pi$ составляет от J менее 10%, то неравномерностью распределения $j(x)$ без особых погрешностей можно пренебречь.

Практикой давно установлен факт повышения качества коммутации МПТ, особенно малой мощности, путем применения составных щеток, элементы которых выполнены из контрастных марок [13, 14, 15, 16]. Составные щетки представляют собой комбинацию из двух частей, выполненных из материала с различным удельным сопротивлением. При этом элемент щетки, расположенный со стороны набегающего края, имеет малое удельное сопротивление материала (металлографит), а элемент сбегающего края выполнен из материала с повышенным удельным сопротивлением (электрографит). Широко распространены, например, такие пары: МГ64 ($\Delta U = 0,46$ В) и ЭГ4 ($\Delta U = 1,0$ В); МГ2 ($\Delta U = 0,2$ В) и ЭГ74 ($\Delta U = 1,2$ В) [17].

Для теоретического объяснения эффективности составных щеток на коллекторной установке (рисунок 2.5) были сняты гистограмма распределения $j(x)$ и осциллограммы тока $i_n(x)$ для трехэлементной щетки ЭГ74 – МГ2 – ЭГ74. Как видно из рисунка 2.9, усредненная опытная кривая $i_n(x)$ содержит пологий участок малого тока, как в начальной, так и завершающей фазе короткого замыкания секции, что особенно благоприятно для качества коммутации реверсивных ТЭД.

Вид опытной кривой тока коммутации можно объяснить следующим образом. Проводящая часть контактной поверхности коллектора по отношению к рабочей поверхности щетки представляет собой идеальный проводник (удельное сопротивление меди на три порядка ниже удельного сопротивления угля), поэтому все α -пятна при протекании через них составляющих тока нагрузки машины (без учета сопротивлений R_s) эквипотенциальны и, следовательно, в этом случае для каждой области стягивания линий тока в теле щетки должно выполняться следующее условие:

$$\Delta U = j(x) r_k(x) = \text{const}, \quad (2.24)$$

где $r_k(x)$ – распределение по ширине скользящего контакта его удельного сопротивления.

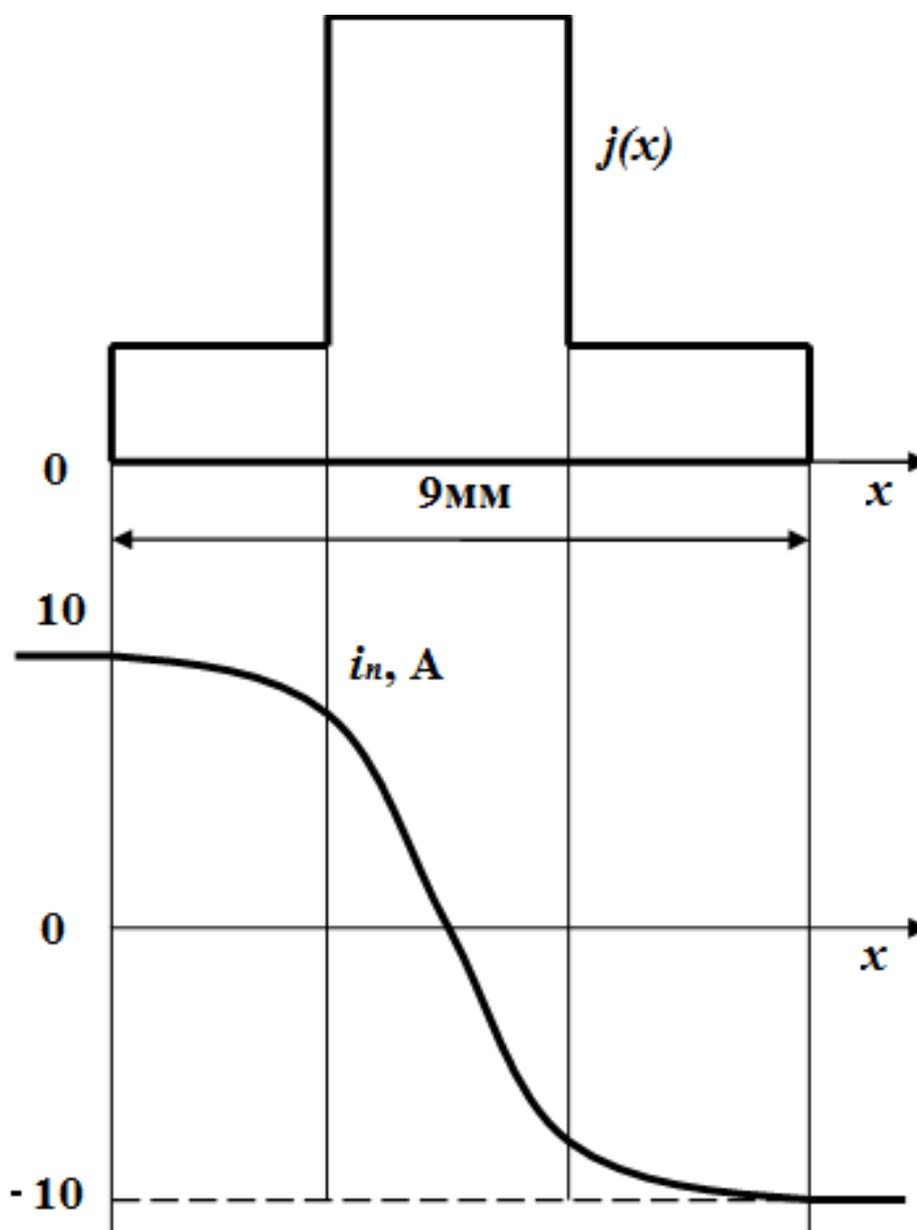


Рисунок 2.9. Опытная кривая тока перемычки для трехэлементной щетки

Подставляя значение функции $j(x)$ из (2.24) в уравнение (2.16), получим

$$i_n(x) = 0,5i_{щ} - \Delta U l_{щ} \int_0^x \frac{dx}{r_k(x)}. \quad (2.25)$$

Из уравнения (2.25) видно, что, искусственно меняя распределение по ширине скользящего контакта его удельного сопротивления, можно управлять характером коммутации тока. Чем больше или меньше $r_k(x)$ на данном участке контактной дуги щетки, тем на нем медленнее или быстрее изменяется ток коммутации секции. Вид кривой $i_n(x)$ на рисунке 2.9 обусловлен тем, что большая часть тока нагрузки протекает через центральный элемент составной щетки, где практически и изменяется ток коммутации переключки.

Как уже отмечалось, применение составных щеток позволяет существенно повысить качество коммутации МПТ, особенно малой мощности без ДП. Это обусловлено тем, что на завершающем этапе коммутации тока в секции при наличии в ее кривой пологого участка малого тока ЭДС самоиндукции этой секции очень мала и ее не нужно компенсировать при помощи ЭДС вращения от поля ДП.

Образование пологого участка малого тока в кривой тока коммутации можно также получить путем изменения геометрии щеток. На рисунке 2.10 приведена конструкция сплошной однородной щетки, имеющей на своих краях скосы, размер которых равен

$$b_c \leq b_l. \quad (2.26)$$

Допустим, что через эту щетку протекает постоянный ток $I = 2i_a$ и его плотность распределена под щеткой равномерно, т.е.

$$j(x) = J = \frac{2i_a}{l_{щ}(b_{щ} - b_c)}. \quad (2.27)$$

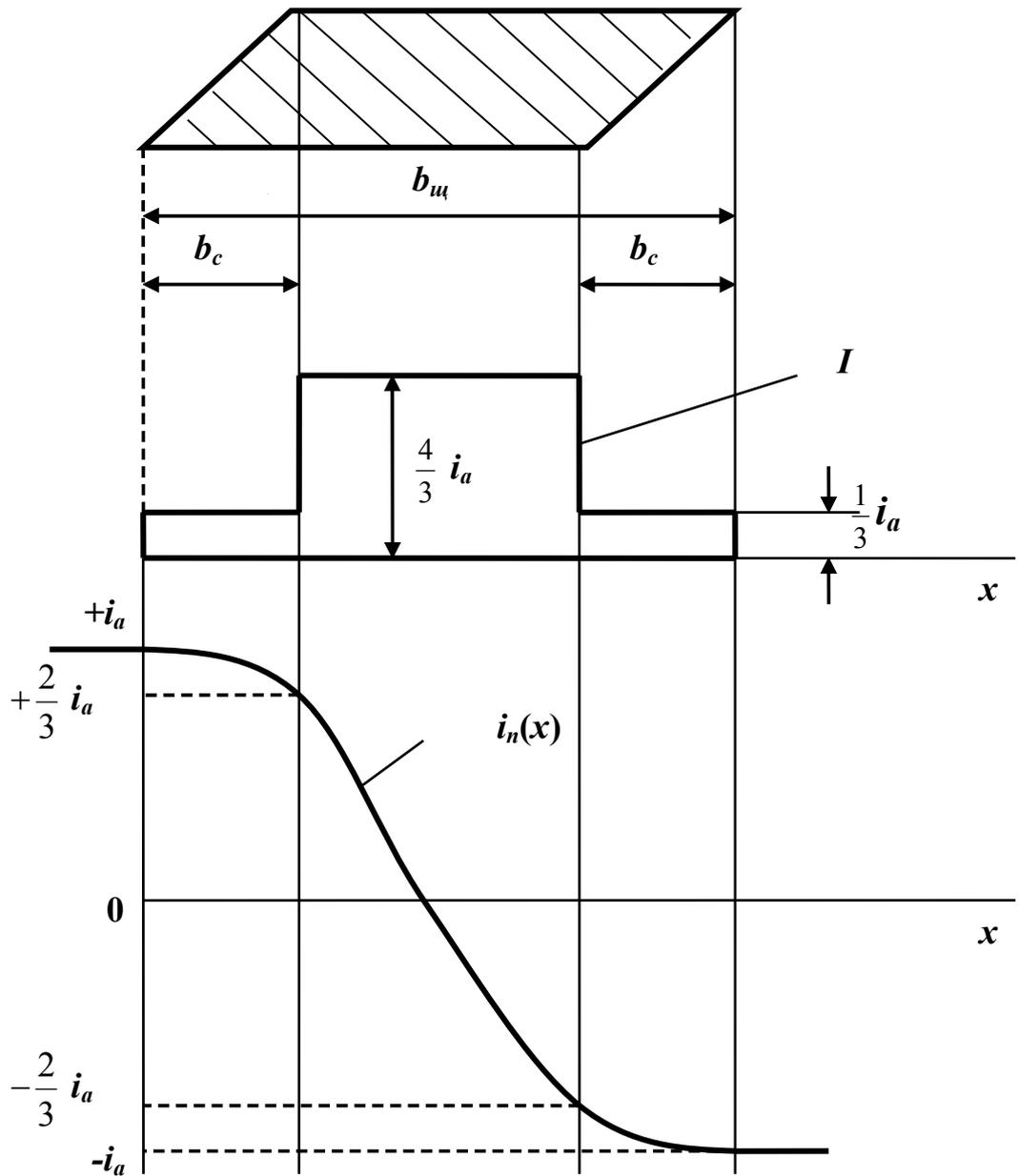


Рисунок 2.10. Коммутация тока при наличии скосов на краях щетки

Для этого случая $b_c = b_{щ}/4$ характер распределения по ширине щетки тока нагрузки приведен на рисунке 2.10.

В соответствии с (2.3), (2.12), (2.13), (2.16), (2.27) и рисунок 2.10 имеем:

при $0 \leq x \leq b_c$

$$dI(x) = J l_{uy} \frac{x}{b_c} dx ;$$

$$I(x) = \int_0^x dI(x) = \frac{J l_{uy} x^2}{b_c 2} ;$$

$$i_n(x) = i_a - \frac{J l_{uy} x^2}{b_c 2} ; \quad (2.28)$$

$$i_n(0) = 0 \quad \text{и} \quad i_n(b_c) = \frac{2}{3} i_a ; \quad (2.29)$$

при $b_c \leq x \leq b_{uy} - b_c$

$$dI(x) = J l_{uy} dx ;$$

$$I(x) = \int_0^x dI(x) = I(b_c) + \int_{b_c}^x dI(x) = \frac{J l_{uy} b_c^2}{2} + J l_{uy} (x - b_c) ;$$

$$i_n(x) = i_n(b_c) - J l_{uy} (x - b_c) ; \quad (2.30)$$

$$i_n(b_{uy} - b_c) = -\frac{2}{3} i_a ; \quad (2.31)$$

при $b_{uy} - b_c \leq x \leq b_{uy}$

$$dI(x) = J l_{uy} \frac{b_{uy} - x}{b_c} dx ;$$

$$I(x) = \int_0^x dI(x) = I(b_{uy} - b_c) + \int_{b_{uy} - b_c}^x dI(x) = \frac{J l_{uy}}{2} + J l_{uy} (b_{uy} - 2b_c) =$$

$$= \frac{J l_{uy} b_{uy}}{b_c} (x - b_{uy} + b_c) + \frac{J l_{uy}}{b_c} \left[\frac{x^2}{2} - \frac{(b_{uy} - b_c)^2}{2} \right] ;$$

$$i_n(x) = i_n(b_{uy} - b_c) - \frac{J l_{uy} b_{uy}}{b_c} (x - b_{uy} + b_c) + \frac{J l_{uy}}{b_c} \left[\frac{x^2}{2} - \frac{(b_{uy} - b_c)^2}{2} \right] ; \quad (2.32)$$

$$i_n(b_{uy}) = -i_a . \quad (2.33)$$

С учетом (2.28)–(2.33) на рисунке 2.10 построена кривая тока коммутации пассивной секции. Ее сравнение с $i_n(x)$ на рисунке 2.9 показывает, что обе кривые в их начальной и конечной части содержат пологий участок малого тока, т.е. наличие скосов на краях однородной щетки приводит к тому же эффекту, который получается при использовании составных щеток. Основной недостаток щеток со скосом связан с тем, что при такой конструкции разрыв контуров коммутируемых секций происходит примерно в одном и том же месте их сбегających ламелей, что приводит к неравномерному искровому износу скользящего контакта по его длине.

В крупных МПТ по длине коллектора располагаются $n_{щ}$ щеток. В этом случае образование пологого участка малого тока в кривой $i_n(x)$ можно добиться путем раздвижки щеток (рисунок 2.11) или посредством установки по длине коллектора щеток, имеющих различную ширину (рисунок 2.12).

При этом желательно соблюдать следующие условия:

$$\Delta b = \Delta b_{щ}(n_{щ} - 1) \approx b_{л}; \quad (2.34)$$

$$0,5(b_{щ} - b_y) \approx b_{л}, \quad (2.35)$$

где $\Delta b_{щ}$ – раздвижка одной щетки; b_y – геометрическая ширина узкой щетки.

С учетом (2.1) и (2.34) при равенстве контактной дуги щетки ее расчетной ширине для полного коммутационного пути секции в случае простой петлевой обмотки якоря и раздвижки или установке широких и узких щеток соответственно имеем

$$b_{к} = b_{щ} - b_u + \Delta b = b_{щ} - b_u + \Delta b_{щ} (n_{щ} - 1); \quad (2.36)$$

$$b_{к} = b_{щ} - b_u. \quad (2.37)$$

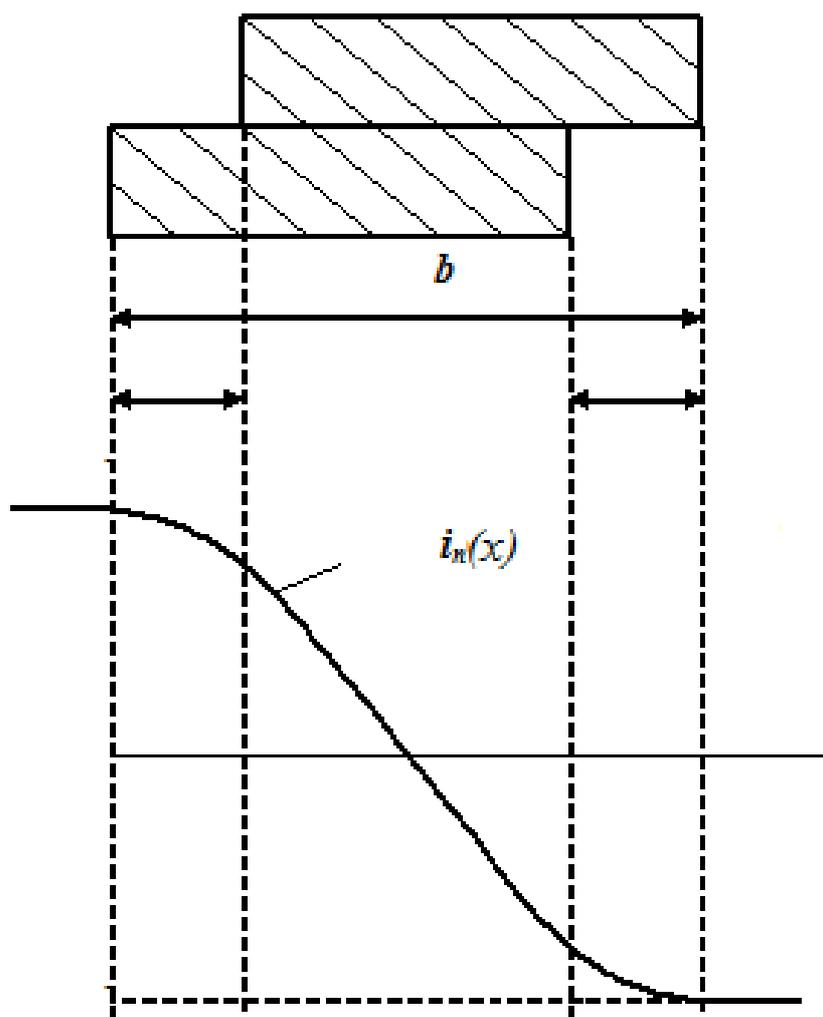


Рисунок 2.11. Коммутация тока при раздвижке щеток

В конструкции скользящего контакта, изображенной на рисунок 2.12, эффект "малого тока" в кривой $i_n(x)$ по аналогии с составными щетками можно усилить путем установки по длине коллектора щеток различных марок (например, для узких щеток – МГ2, а для широких – ЭГ74).

Таким образом, щеточный контакт (его конструкция и геометрические размеры) оказывает существенное влияние на характер коммутации тока в короткозамкнутых секциях и, целенаправленно меняя параметры щеток, можно заметно улучшить качество коммутации МПТ [27].

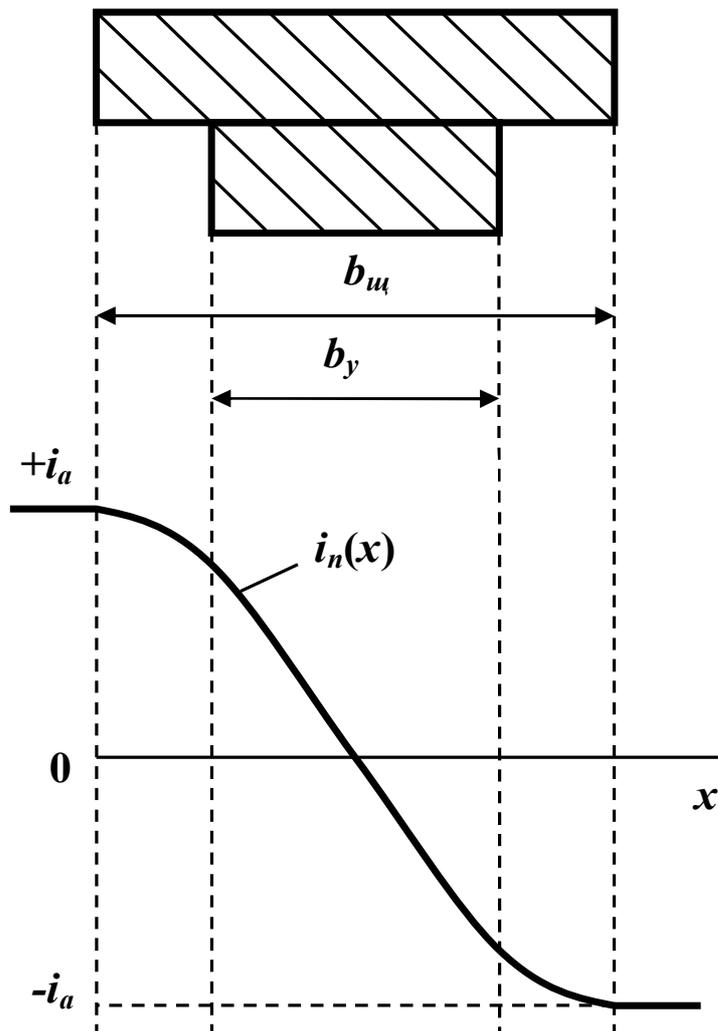


Рисунок 2.12. Коммутация тока при различной ширине щеток

В России ТЭД пульсирующего тока имеют по длине коллектора три щетки. Для них разработана и прошла эксплуатационные испытания конструкция щеткодержателя, обеспечивающего скользящий контакт, приведенный на рисунке 5, [26].

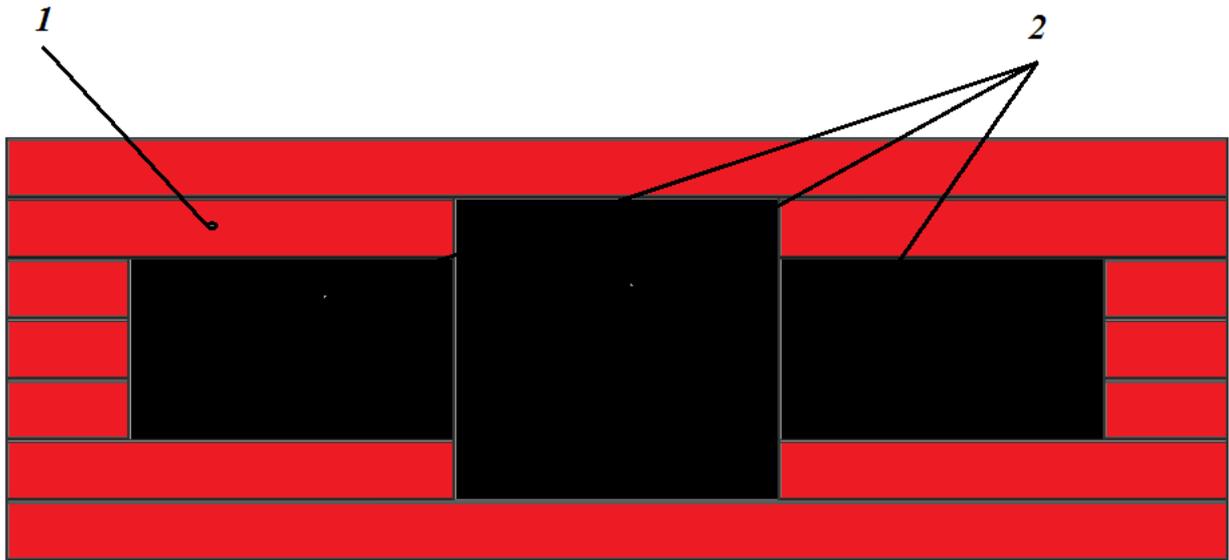


Рисунок 5. Конструкция щеточного контакта для ТЭД пульсирующего тока:

1 – коллектор; 2 – щетки

2.3 Влияние типа обмотки якоря и его конструкции

Для определения характера изменения тока у секций простой волновой обмотки с полным комплектом щеток рассмотрим 4-полюсную ($p = 2$) МПТ, у которой щетки перекрывают два коллекторных деления. Для схемы замещения якорной обмотки (рисунок 2.13) при равномерном распределении под щетками протекающего через них тока нагрузки на основании первого закона Кирхгофа можно записать

$$\left. \begin{aligned}
 i_{n1} &= i_a; \\
 i_{n2} &= i_{n1} - i_{л1} = i_a - \frac{1}{4}i_a = \frac{3}{4}i_a; \\
 i_{n3} &= i_{n2} - i_{л2} = \frac{3}{4}i_a - \frac{1}{2}i_a = \frac{1}{4}i_a; \\
 i_{n4} &= i_{n3} - i_{л3} = \frac{1}{4}i_a - \frac{1}{2}i_a = -\frac{1}{4}i_a; \\
 i_{n5} &= i_{n4} - i_{л4} = -\frac{1}{4}i_a - \frac{1}{2}i_a = -\frac{3}{4}i_a; \\
 i_{n6} &= i_{n5} - i_{л5} = -\frac{3}{4}i_a - \frac{1}{4}i_a = -i_a,
 \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

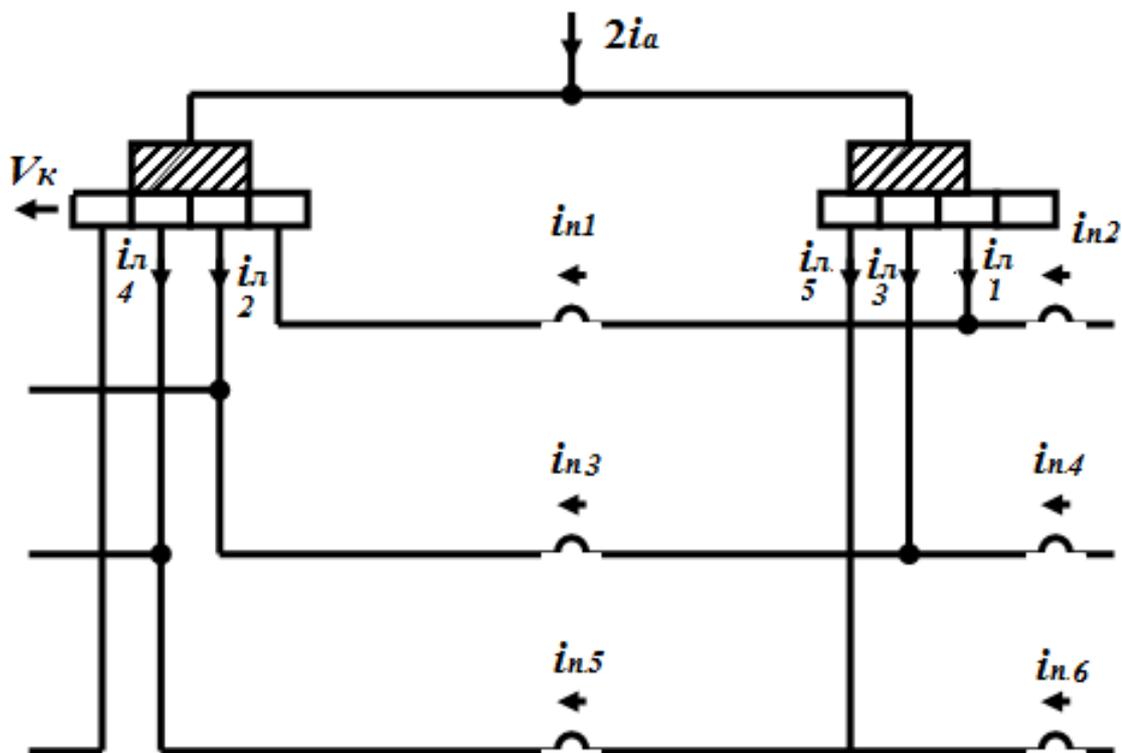


Рисунок 2.13. Коммутация тока в пассивных секциях волновой обмотки

Как видно из рисунка 2.13 и системы уравнений (2.38), при медленном вращении коллектора ток в секции, вступающей в короткое замыкание, при каждом перемещении ламелей коллектора 1 и 2, с которыми она соединена, на пол коллекторного деления поочередно будет принимать значения i_{n2} , i_{n3} , i_{n4} , i_{n5} и $i_{n6} = -i_a$, т.е. будет изменяться от первоначального значения $i_{n1} = i_a$ до своего конечного значения $i_{n6} = -i_a$ под влиянием протекающего через ламели тока нагрузки при их движении относительно однополярных щеток [22].

В соответствии с системой (2.38) на рисунке 2.14 построена кривая изменения тока короткозамкнутой секции простой волновой обмотки при полном комплекте щеток.

В этом случае для полного коммутационного пути секции можно записать

$$b_{\kappa} = b_{uy} - b_u + (p-1) \frac{\beta_{\kappa}}{p}. \quad (2.39)$$

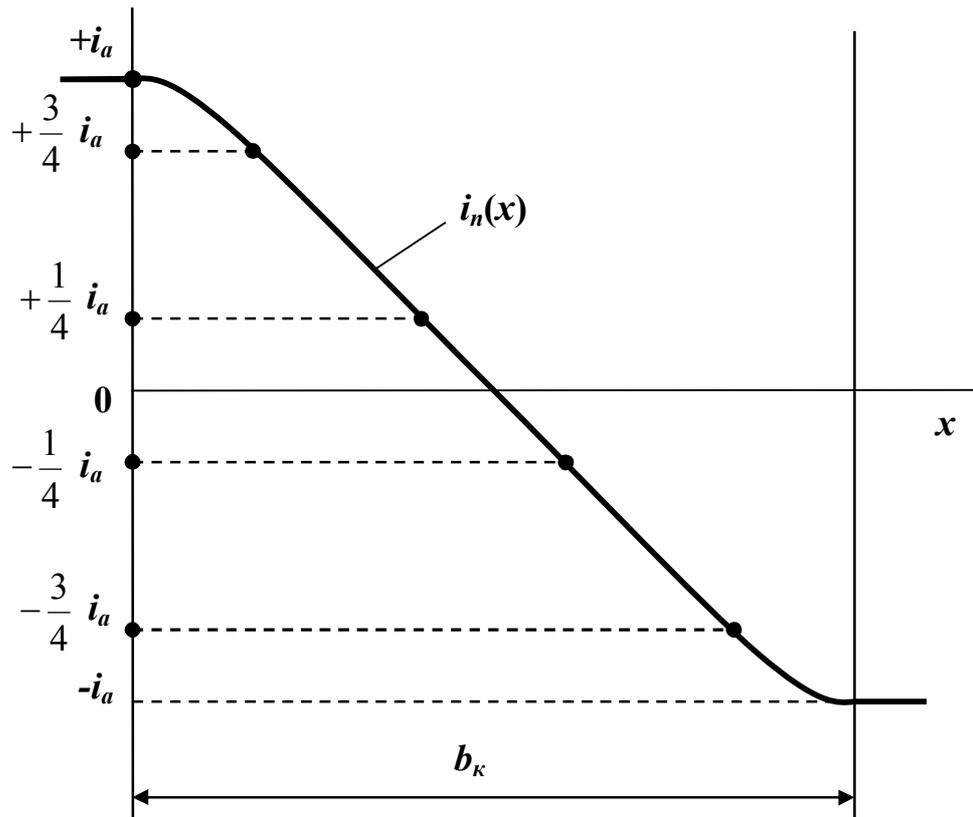


Рисунок 2.14. Изменение тока коммутации в волновой обмотке

Сравнение формул (2.36) и (2.39) позволяет сделать вывод о том, что коммутация тока в пассивной секции простой волновой обмотки при полном комплекте щеток будет происходить как у секции простой петлевой обмотки с $n_{uy} = p$ щетками, расположенными по длине коллектора с раздвижкой на $1/p$ часть коллекторного деления.

Исследуя многоходовую петлевую обмотку якоря, Р. Рихтер установил, что при прямолинейной коммутации нарушается равномерное распределение плотности тока под щеткой [2]. Более поздние исследования показали, что на самом деле искажается не распределение $j(x)$, а сами кривые тока коммутации секций [18, 19, 20, 21].

На рисунке 2.15 при вращении коллектора по часовой стрелке начинает коммутировать секция A первого хода трехходовой петлевой обмотки якоря.

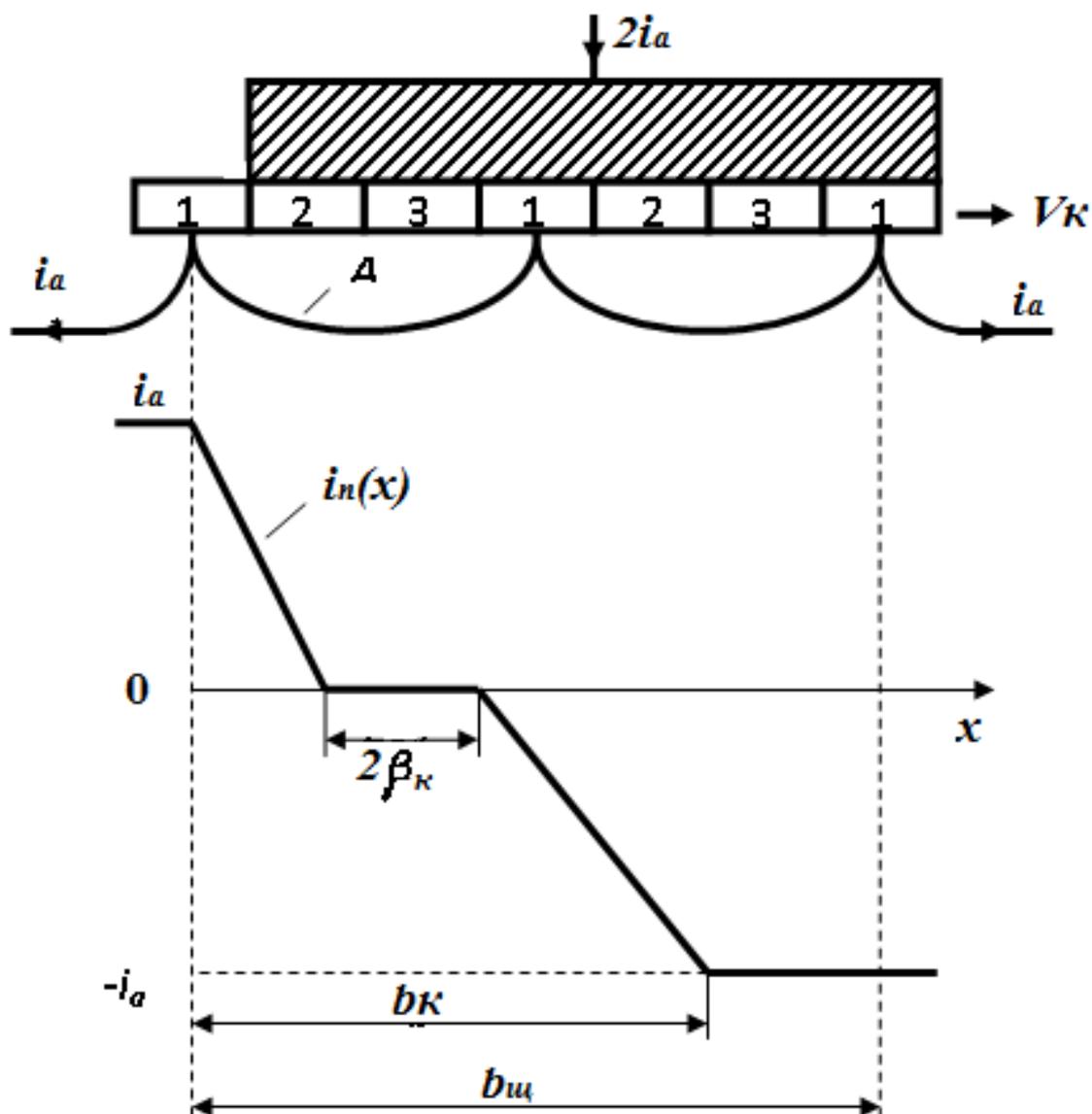


Рисунок 2.15. Коммутация тока в секции трехходовой петлевой обмотки

При перемещении коллектора на одно его деление ток в секции A (рисунок 2.15) снизится от i_a до нуля. Затем, на протяжении коммутационного пути, равного двум коллекторным делениям, пока щеткой будут перекрываться коллекторные пластины других ходов обмотки, влияние тока нагрузки на процесс коммутации тока в секции A прекращается. Он начнет изменяться

от 0 до $-i_a$ только при замыкании щеткой следующей пластины коллектора первого хода обмотки и прекратится после полного перекрытия этой ламели. Вышеизложенный характер коммутации тока в секции A приведен на рисунке 2.15, из которого видно, что ток $i_n(x)$ не изменяется на протяжении коммутационного пути секции $2\beta_k$. Для полного коммутационного пути секции m -ходовой петлевой обмотки можно записать

$$b_k = b_{щ} - b_u - \beta_k(m - 1). \quad (2.40)$$

В качестве мероприятия по устранению приведенных на рисунке 2.15 искажений в кривой тока коммутации секций многоходовой обмотки можно рекомендовать установку по длине коллектора $n_{щ} = m$ щеток с их раздвижкой на коллекторное деление ($\Delta b_{щ} = \beta_k$).

На рисунке 2.16 построена кривая $i_n(x)$ секции трехходовой петлевой обмотки якоря при установке по длине коллектора трех щеток с их раздвижкой на $\Delta b_{щ} = \beta_k$. Как видно из рисунка 2.16, в этом случае ток секции изменяется непрерывно по прямолинейному закону классической теории. При этом в соответствии с формулами (2.36) и (2.40) полный коммутационный путь секции

$$b_k = b_{щ} - b_u + \Delta b_{щ}(n_{щ} - 1) - \beta_k(m - 1) = b_{щ} - b_u. \quad (2.41)$$

Из формул (2.39)–(2.41) видно, что в секции p -ходовой волновой обмотки якоря при полном комплекте щеток ток будет изменяться как у секции p -ходовой петлевой обмотки с p щетками, расположенными по длине коллектора с раздвижкой на коллекторное деление, т.е. по прямолинейному закону [22].

Таким образом, тип якорной обмотки существенно влияет на процесс изменения тока коммутации в его короткозамкнутых секциях.

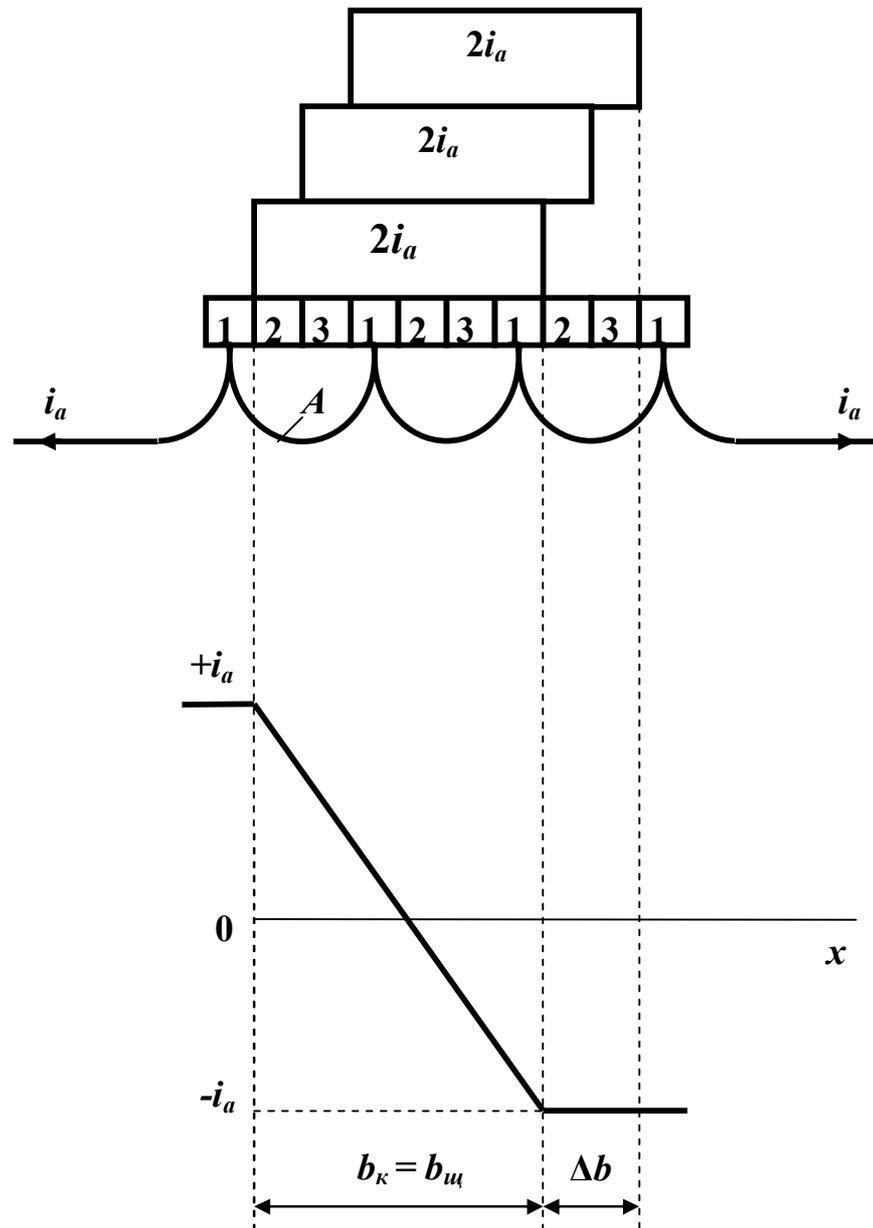


Рисунок 2.16. Коммутация тока при раздвижке щеток

Таким образом, тип якорной обмотки существенно влияет на процесс изменения тока коммутации в его короткозамкнутых секциях.

Выводы по главе 2

1 Процесс изменения тока в короткозамкнутых секциях при многоламельном щеточном перекрытии осуществляется протекающим через скользящий контакт током нагрузки.

2 Мгновенное значение тока коммутации пассивной секции однозначно определяется мгновенным положением ее коллекторных пластин на контактной дуге щетки и мгновенным распределением в ней протекающего через скользящий контакт тока нагрузки.

3 Ток коммутации пассивных секций в момент окончания их короткого замыкания автоматически принимает значение тока параллельной ветви, в которую они переключается, вне зависимости от реальной длины контактной дуги щетки.

4 Классическая прямолинейная коммутация является частным случаем уравнения коммутации тока в пассивной секции при выполнении следующих условий:

- при равенстве контактной дуги щетки ее геометрической ширине;
- при равномерном распределении плотности тока под щеткой;
- при постоянстве режима работы МПТ.

5 Опытная кривая тока коммутации пассивной секции близка по форме к прямолинейной коммутации тока классической теории.

6 Средняя скорость изменения тока коммутации секций не зависит от реального распределения плотности тока в щеточном контакте.

7 Чем больше или меньше удельное сопротивление скользящего контакта на данном участке контактной дуги щетки, тем на нем медленнее или быстрее изменяется ток коммутации секции.

8 При скосе краев щеток, их раздвижке или установке по длине контакта щеток, имеющих различную ширину, в начале и конце кривой тока коммутации секций образуется пологий участок малого тока.

9 Для устранения искажений в кривых тока коммутации секций m -ходовой петлевой обмотки якоря рекомендуется установка по длине коллектора $n_{щ} = m$ щеток с их раздвижкой на коллекторное деление.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛЕЙ

3.1 Изготовление опытной партии щеткодержателей и предварительные испытания

На основании анализа режимов работы ТЭД и с учетом критерия его коммутационной устойчивости разработаны технические решения по конструкции коллекторно-щеточного аппарата [23]. Для ТЭД НБ514Б, применяемых на электровозах 2ЭС5К "Ермак" и ТЭД НБ418К, применяемых на электровозах ВЛ80, подготовлена техническая документация и изготовлена на ОАО НПК "НЭВЗ" опытная партия щеткодержателей с измененной конфигурацией щеток (рисунок 3.1, 3.2).



Рисунок 3.1. Окна опытного щеткодержателя: среднее окно выполнено как у штатного щеткодержателя, а крайние окна более узкие на 5 мм.

Предложенные технические решения [25] основаны на исследовании, в котором изначально уточняются условия передачи тока через слой политуры коллектора, механизм изменения тока при многоламельном щеточном

перекрытии и физические условия искрообразования под щеткой [23]. Это позволяет полнее учесть взаимное влияние друг на друга коммутационных процессов, протекающих как в скользящем контакте, так и в короткозамкнутых секциях, и установить взаимосвязь между найденным условием возникновения искрения и основными факторами, влияющими на этот процесс. Из полученного при этом общего уравнения [23] логически вытекают методика прогнозирования области безыскровой работы ТЭД и критерий его коммутационной способности. Анализ этого критерия указывает на новые способы снижения коммутационной напряженности коллекторных электродвигателей.

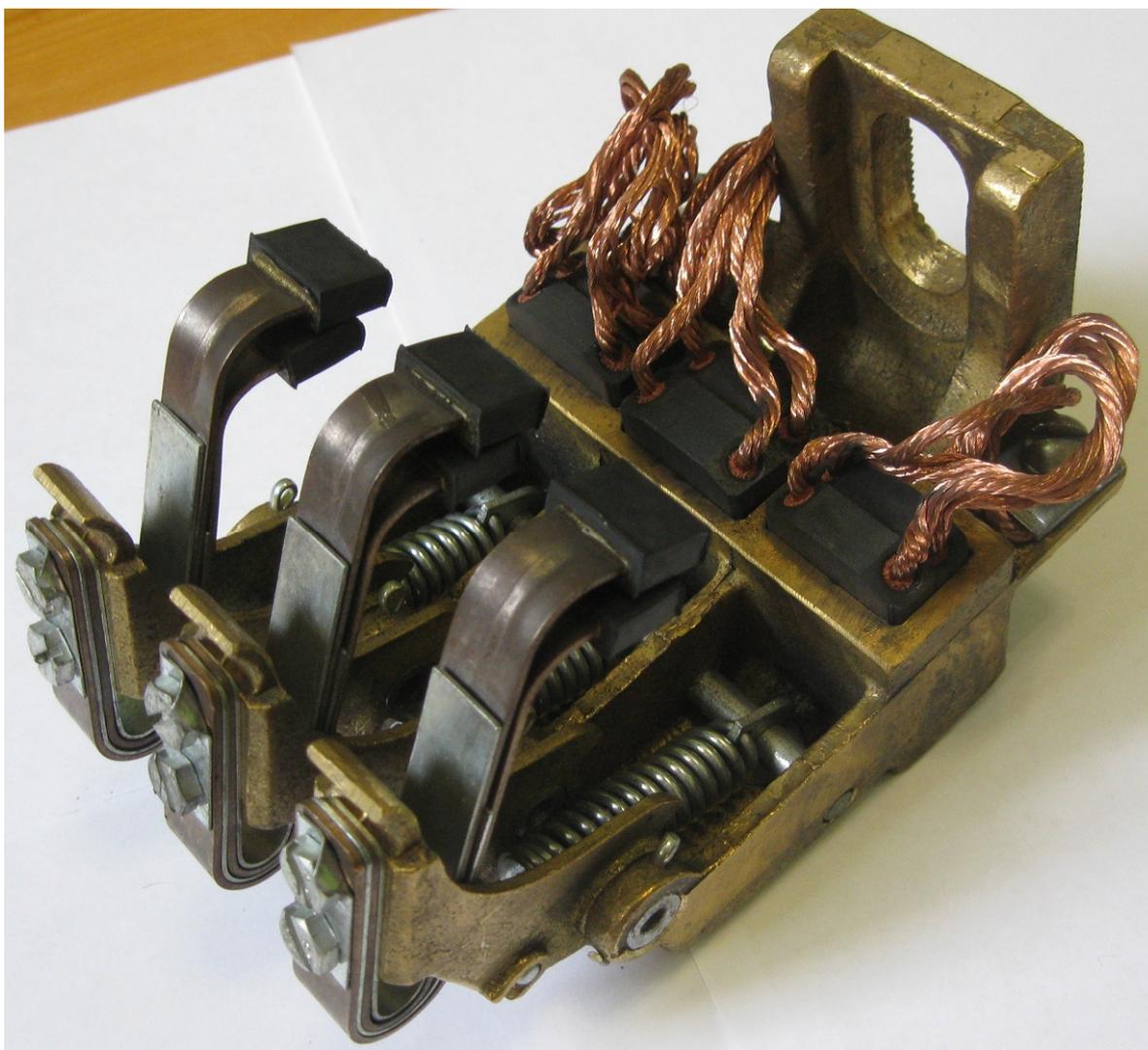


Рисунок 3.2. Щеткодержатель с измененной конфигурацией щеток

Габаритные размеры опытных щеткодержателей не отличаются от серийных, конструкция максимально унифицирована с серийными щеткодержателями.

После изготовления и настройки нажатия пальцев опытных щеткодержателей были проведены предварительные испытания на испытательной станции Электровозоремонтного завода филиала ОАО "ЖЕЛДОРРЕММАШ" (рисунок 3.3). Испытания проводились на двигателе НБ514 № 7100, якорь № 1120 в часовом режиме при номинальном токе. В конце испытаний ток был увеличен в 1,4 раза от номинального значения в течение 15 секунд.



Рисунок 3.3. Предварительные испытания опытных щеткодержателей

Опытные щеткодержатели подтвердили свою работоспособность в номинальном режиме (ток 905 А) и в режиме перегрузки по току (ток 1265 А, напряжение 1240 В). В номинальном режиме работы двигателя искрение отсутствовало (темная коммутация). В режиме перегрузки по току искрение на опытных щеткодержателях визуально было меньше, чем на стандартных (акт испытаний - Приложение 1).

3.2 Определение области безискровой работы

Объект испытаний - тяговый двигатель пульсирующего тока типа НБ-514Б (далее – ТЭД) № 2672 (якорь № 808, остов № 762) с опытными щеткодержателями, отличающимися конфигурацией окон для установки щеток.

ТЭД представляет собой шестиполюсную компенсированную коллекторную электрическую машину пульсирующего тока последовательного возбуждения, опорно-осевого подвешивания с независимой вентиляцией. ТЭД предназначены для установки на электровозы магистральные 2ЭС5К, 3ЭС5К. Изоляция всех обмоток ТЭД выполнена по классу нагревостойкости «Н». Согласно комплекту технической документации 6ТС.155.030 ТЭД имеет параметры (номинальные значения), представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные параметры (номинальные значения) ТЭД

Наименование параметров	Режимы работы	
	Часовой	Продолжительный
Мощность на валу, кВт	820	765
Напряжение на выводах, В	1000	
Ток нагрузки, А	870	810
Частота вращения, об/мин	920	940
Момент на валу М, Н·м	8513	7773
Коэффициент полезного действия при питании постоянным током, %	94,55	94,70
Степень возбуждения номинальная, %	98	
Степень возбуждения минимальная, %	48	
Количество охлаждающего воздуха, м ³ /мин	70	
Масса ТЭД, кг	4300 ± 60	

Испытания проводились с целью определения области безыскровой работы (далее – ОБР) ТЭД с опытными щеткодержателями.

Программа испытаний:

1. Притирка механическим способом контактной поверхности каждой щетки к коллектору.

Перед началом испытаний внешним осмотром (визуально) проверено:

- комплектность ТЭД;
- качество сборки узлов, затяжка болтов;
- отсутствие стуков, ударов, затираний в подшипниковых узлах путем проворота якоря при малых оборотах;
- отсутствие повреждений щеточно-коллекторного узла, загрязнений и механических повреждений изоляции видимых частей обмоток;
- соответствие требованиям конструкторской документации по установке щеткодержателей и щеток (установка щеток в нейтральное положение по меткам на остоле и траверсе), наличие зазора между щеткодержателем и коллектором, отсутствию заеданий при перемещении нажимных пальцев.

В дальнейшем производилась притирка механическим способом контактной поверхности каждой щетки к коллектору до достижения 100 % притертости от рабочей поверхности каждой щетки.

2. Приработка щеток при работе двух ТЭД по схеме взаимной нагрузки в течение 4 ч при номинальном токе нагрузки 810 А и номинальном напряжении на выводах ТЭД 1000 В.

Приработка щеток в течение 4 ч проводилась согласно ГОСТ 11828, ГОСТ 2582 по схеме взаимной нагрузки при питании постоянным током, представленной на рисунке 3.4 (при отключенном генераторе " подпитки-отпитки "). В качестве нагрузочного генератора G использовался однотипный ТЭД.

Испытания проводились согласно электрической схемы взаимной нагрузки, изображенной на рисунке 3.4.

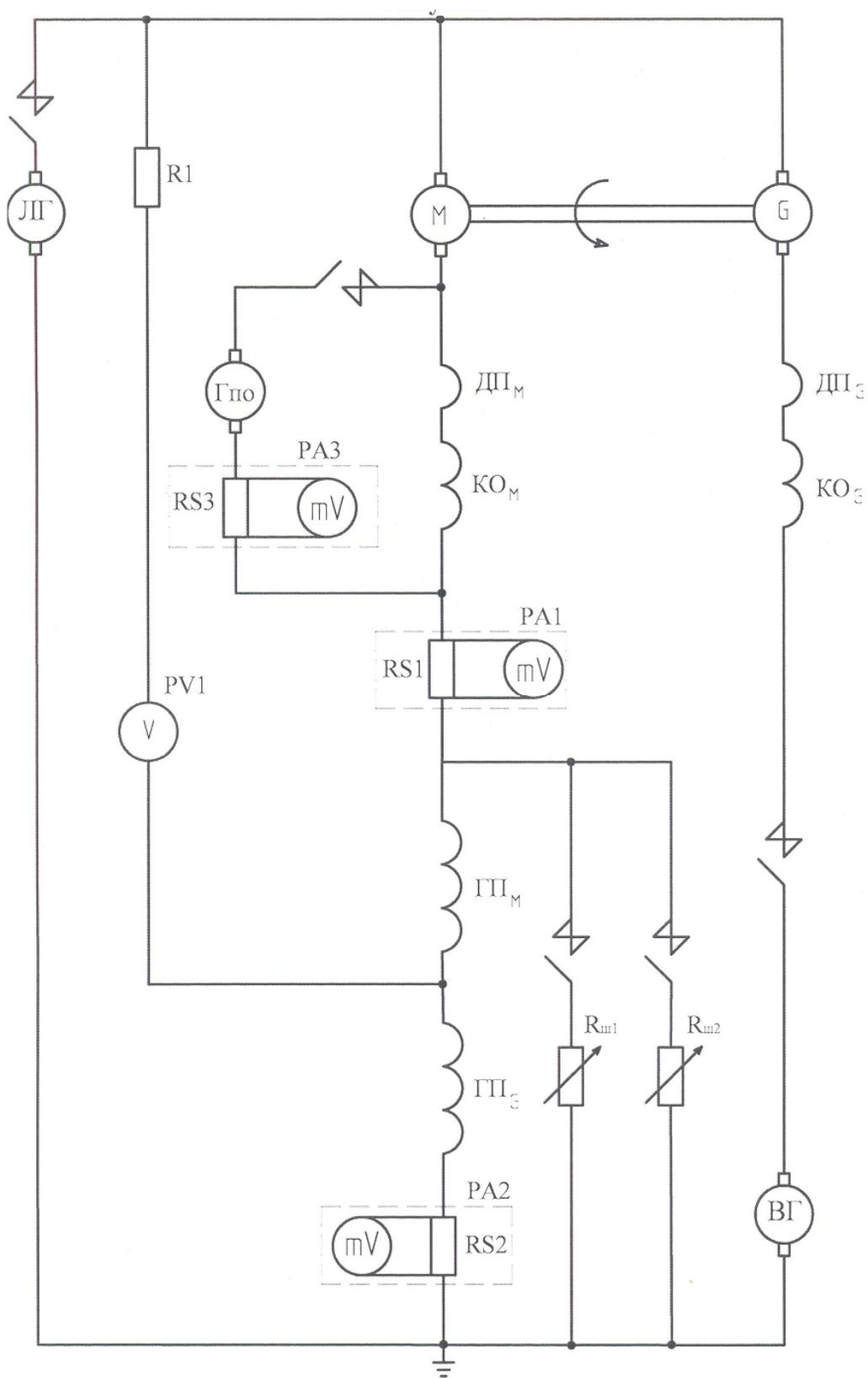


Рисунок 3.4 – Принципиальная электрическая схема взаимной нагрузки с последовательным возбуждением главных полюсов для определения ОБР

Условные обозначения, принятые в схеме на рисунке 3.4:

М – якорь испытуемого ТЭД;

ДПм – обмотка добавочных полюсов испытуемого ТЭД;

КОм – компенсационная обмотка испытуемого ТЭД;

ГПм – обмотка главных полюсов испытуемого ТЭД;

Г – якорь ТЭД, работающего в генераторном режиме;

ДПГ – обмотка добавочных полюсов ТЭД, работающего в генераторном режиме;

КОГ – компенсационная обмотка ТЭД, работающего в генераторном режиме;

ГПГ – обмотка главных полюсов ТЭД, работающего в генераторном режиме;

ЛГ – линейный генератор;

ВГ – вольтдобавочный генератор;

Гпо – генератор «подпитки – отпитки» обмоток ДПм и КОм;

Рш1, Рш2 – резисторы шунтировки главных полюсов;

Р1 – добавочное сопротивление типа Р82/3;

РА1, РА2, РА3 – амперметры;

RS1, RS2, RS3 – шунты измерительные;

PV1, V – вольтметры;

mV – милливольтметр;

Ia – ток, протекающий в якорной цепи, А;

Iан – номинальный ток в якорной цепи в часовом режиме, Iан = 870 А;

ip – ток «подпитки-отпитки» ДПм и КОм, А;

U – напряжение на выводах ТЭД, В;

β – степень возбуждения главных полюсов, %.

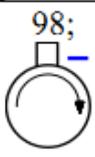
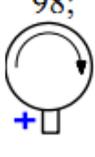
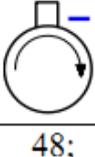
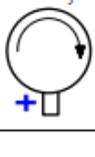
Расход охлаждающего воздуха 70 м³/мин устанавливался перед началом испытания по значению статического давления в коллекторной камере ТЭД.

3. Определение ОБР при опытном щеткодержателе для одного направления вращения якоря при питании постоянным током при номинальном напряжении на выводах ТЭД 1000 В и степени возбуждения главных полюсов 98 % и 48 %.

ОБР определялись при $U = 1000 \text{ В}$, на щетках разной полярности для одного направления вращения якоря согласно ГОСТ 10159 при работе ТЭД по схеме взаимной нагрузки методом "подпитки-отпитки" обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки (рисунок 3.4).

Результаты испытаний по определению ОБР приведены в таблице 3.2 и на рисунках 3.5 – 3.8.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний по определению ОБР

$\beta, \%$; щётка и направление вращения	Степень искрения, балл, до подпитки- отпитки	$I_a, \text{ А}$	Подпитка $i_{п}, \text{ А}$	Отпитка $i_{п}, \text{ А}$
98; 	1	1300	43	14
	1	1088	35	17
	1	870	27	23
	1	653	20	24
	1	435	14	24
98; 	1	1300	49	8
	1	1088	39	13
	1	870	31	21
	1	653	23	25
	1	435	16	24
48; 	1	1300	16	6
	1	1088	14	9
	1	870	10	11
	1	653	5	14
	1	435	5	14
48; 	1	1300	28	7
	1	1088	18	8
	1	870	10	12
	1	653	5	16
	1	435	5	16

На рисунках 3.5 и 3.6 представлены зависимости

$$\frac{i_n}{I_{ан}} = f\left(\frac{I_a}{I_{ан}}\right), \%$$

На рисунках 3.7 и 3.8 представлены зависимости

$$\frac{i_n}{I_a} = f(I_a), \%$$

После испытания в ТЭД отсутствуют изменения, влияющие на их работоспособность:

- биение коллектора составило 0,04 мм, что не более допустимого согласно ГОСТ 2582 значения 0,04 мм;
- в конструкции ТЭД отсутствуют механические повреждения обмоток, подшипников, остова, якоря и других узлов ТЭД;
- отсутствуют температурные деформации щеточного аппарата, повреждения и подгорания на поверхности коллектора.

Методы и результаты испытаний:

Допускаемые отклонения параметров – по ГОСТ 2582.

Перечень ссылочных нормативных документов представлен в [31, 32, 33, 34].

Испытания проводились при нормальных климатических условиях в соответствии с требованиями ГОСТ 15150:

- температура воздуха от 15 °С до 35 °С;
- относительная влажность воздуха от 45 % до 80 %;
- атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт.ст.).

По результатам проведенных испытаний определены области безыскровой работы ТЭД с опытными щеткодержателями.

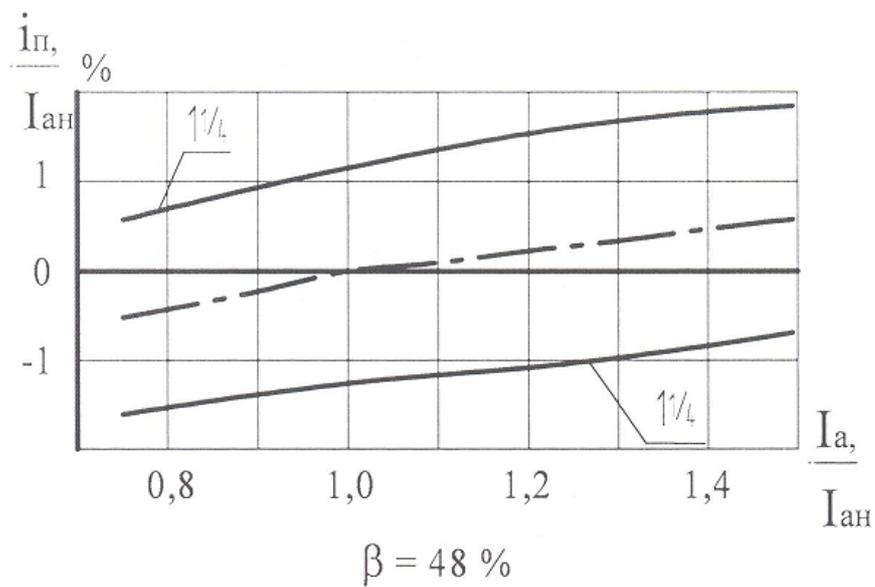
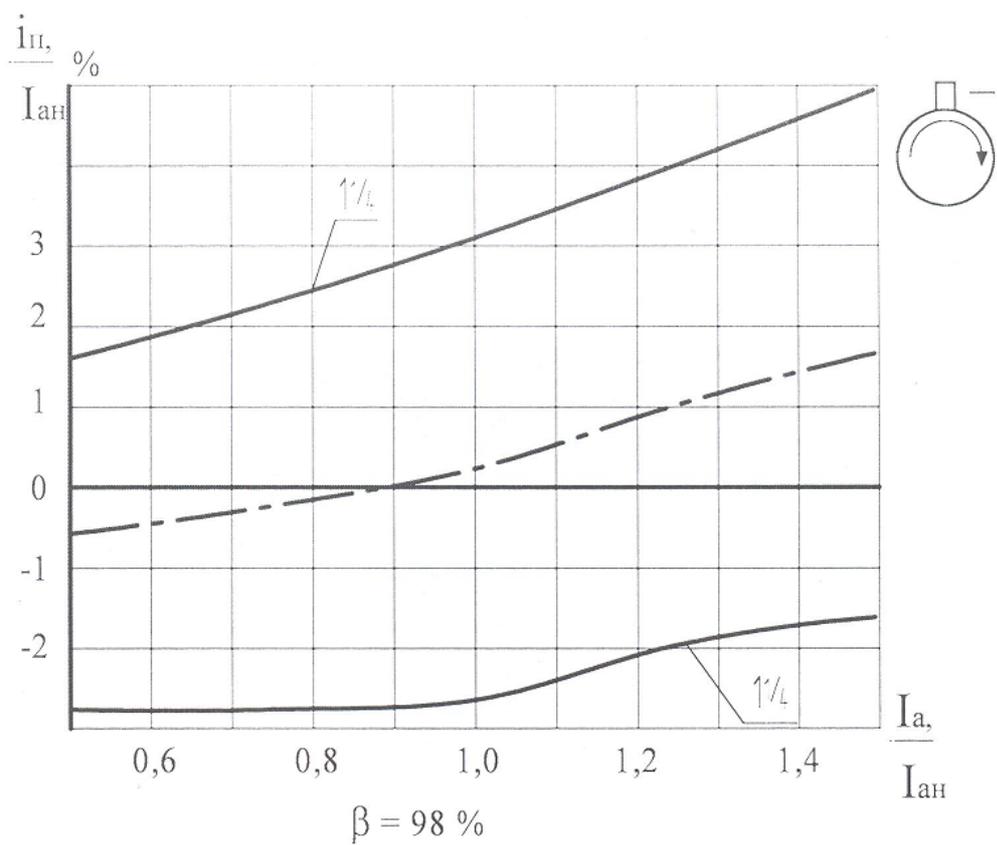


Рисунок 3.5 – ОБР под минусовой щеткой ТЭД с опытными

щеткодержателями (зависимость $\frac{i_{п}}{I_{ан}} = f\left(\frac{I_a}{I_{ан}}\right), \%$)

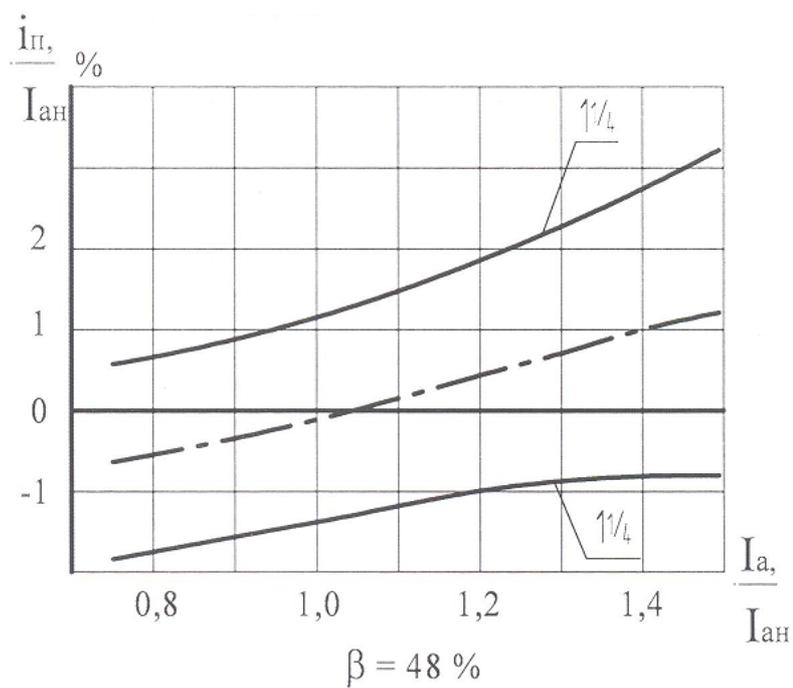
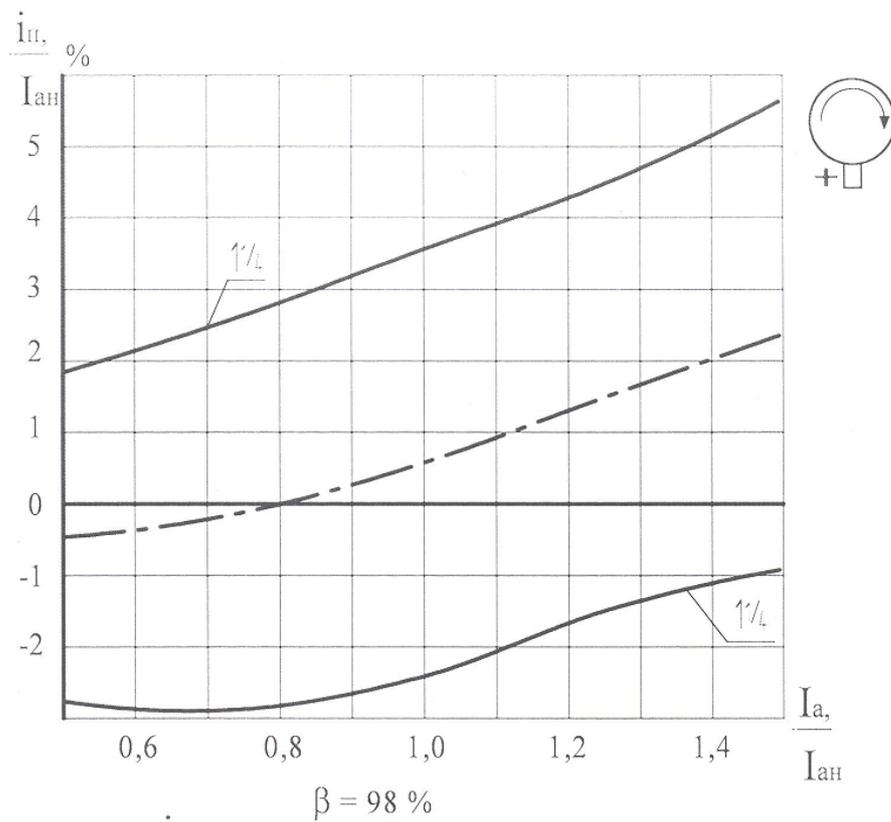


Рисунок 3.6 – ОБР под плюсовой щеткой ТЭД с опытными щеткодержателями (зависимость $\frac{i_{\pi}}{I_{ан}} = f\left(\frac{I_a}{I_{ан}}\right)$, %)

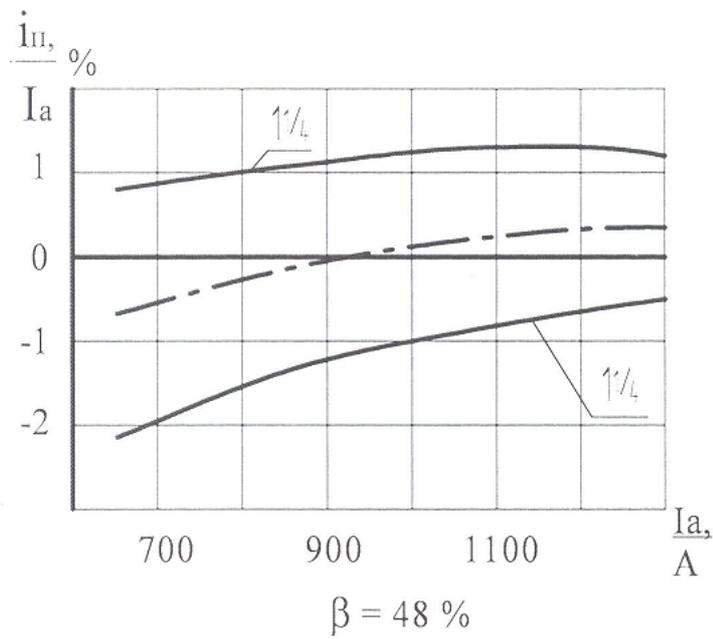
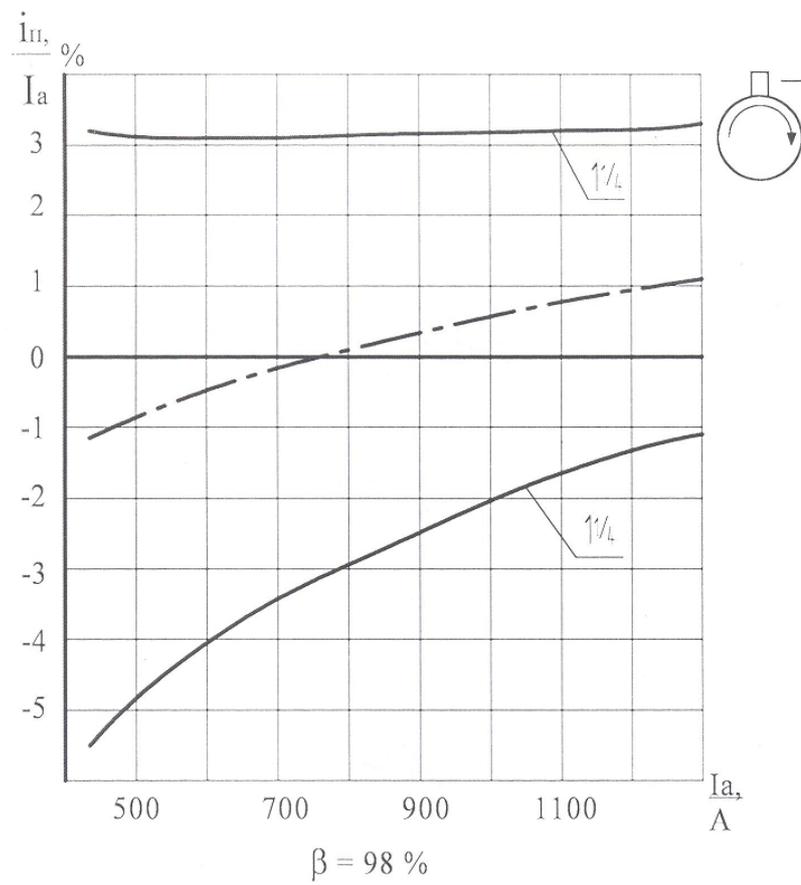


Рисунок 3.7 – ОБР под минусовой щеткой ТЭД с опытными

щеткодержателями (зависимость $\frac{\dot{i}_n}{I_a} = f(I_a), \%$)

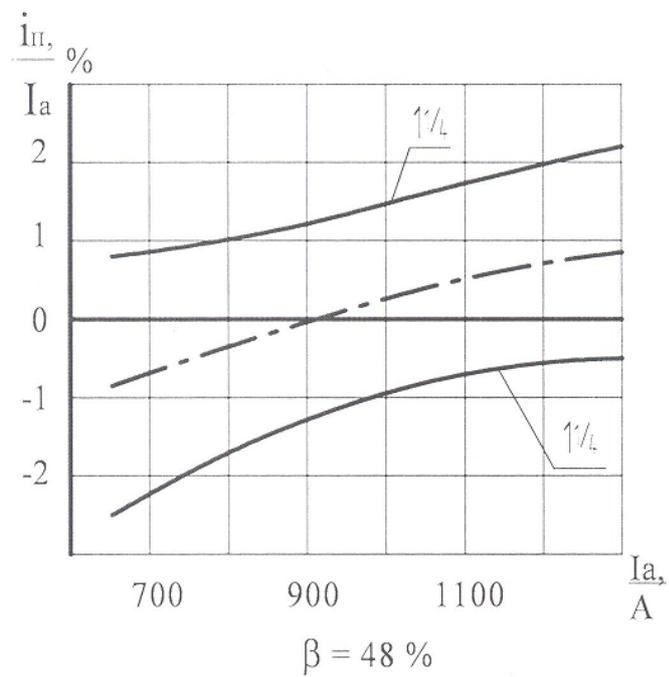
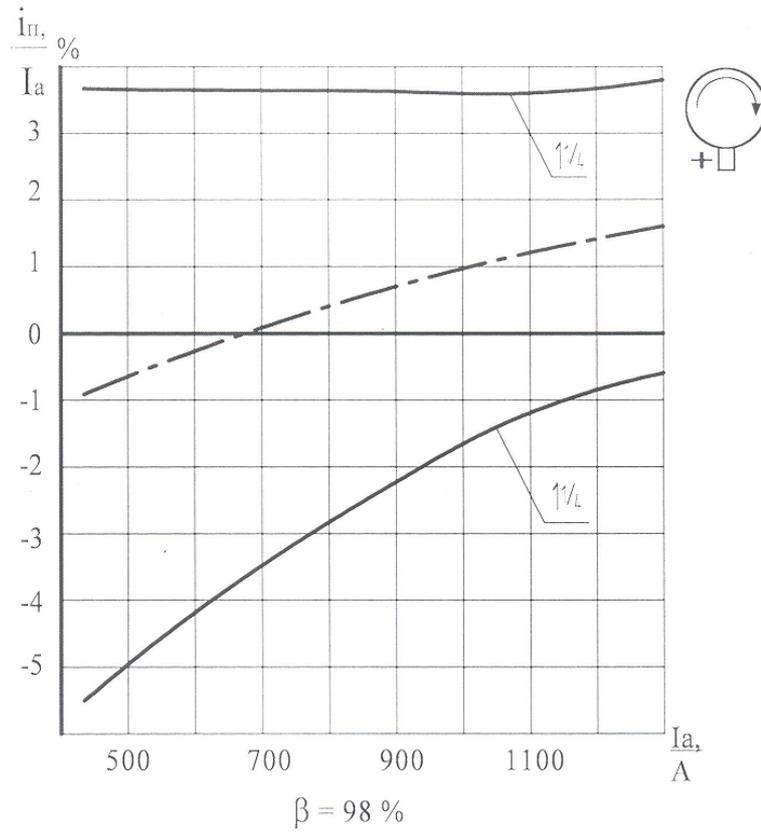


Рисунок 3.8 – ОБР под плюсовой щеткой ТЭД с опытными щеткодержателями (зависимость $\frac{\dot{i}_n}{I_a} = f(I_a, \%)$)

Из экспериментальных данных, изображенных на рисунке 3.7 и рисунке 3.8 следует, что при подпитке дополнительного полюса область безыскровой работы практически мало зависит от тока якоря.

3.3 Сравнительный анализ области безыскровой работы опытных и штатных щеткодержателей.

Для выяснения степени влияния на искровой износ щеток электромагнитных и механических факторов экспериментальные данные по области безыскровой работы тягового электродвигателя НБ-514Б были сравнены с аналогичными данными, полученными на стенде ВЭлНИИ при испытаниях электродвигателя НБ-514Б со штатными щеткодержателями (протокол периодических испытаний ЭМА-АТ-55-2015). Данные со штатными щеткодержателями приведены на рисунках 3.9, 3.10.

Сравнение приведенных на рисунке 3.7 и рисунке 3.8 областей безыскровой работы опытных щеткодержателей с областями безыскровой работы штатных щеткодержателей рисунок 3.9 и рисунок 3.10 показывает, что их ширина примерно одинакова. Следовательно, влияние электромагнитных факторов на износ щеток так же одинаково, а уменьшение искрового износа в процессе эксплуатации двигателя с опытными щеткодержателями связано со снижением влияния на искрение механических факторов.

В процессе эксплуатации под влиянием механических факторов сбегающие края щеток подвержены сильной вибрации. При этом даже при прямой коммутации обрывается значительный ток, который вызывает повышенный искровой износ щеток. Однако, при опытной конструкции щеткодержателей из-за наличия в кривой тока коммутации пологого участка тока происходит обрыв незначительного тока и этим объясняется снижение искрового износа от влияния механических факторов.

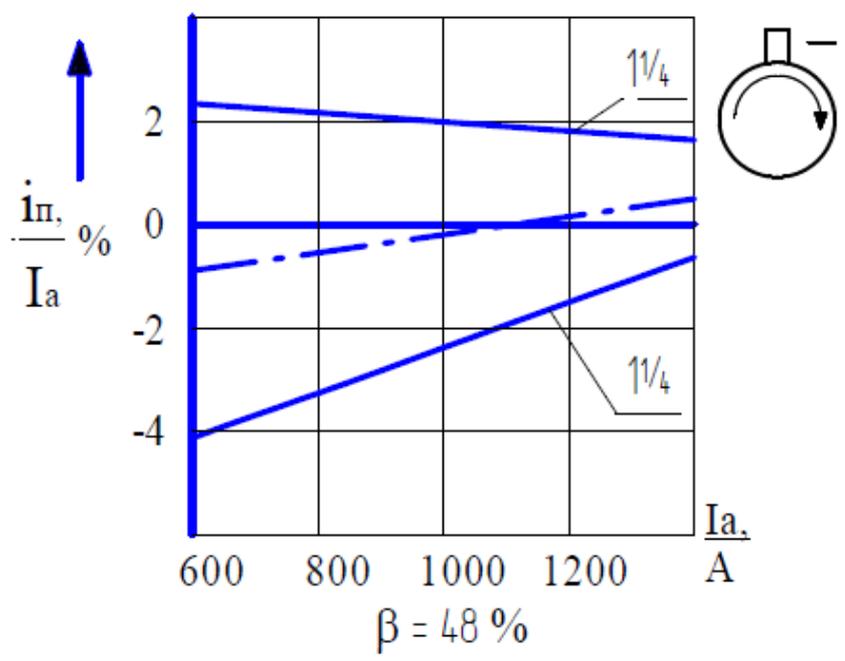
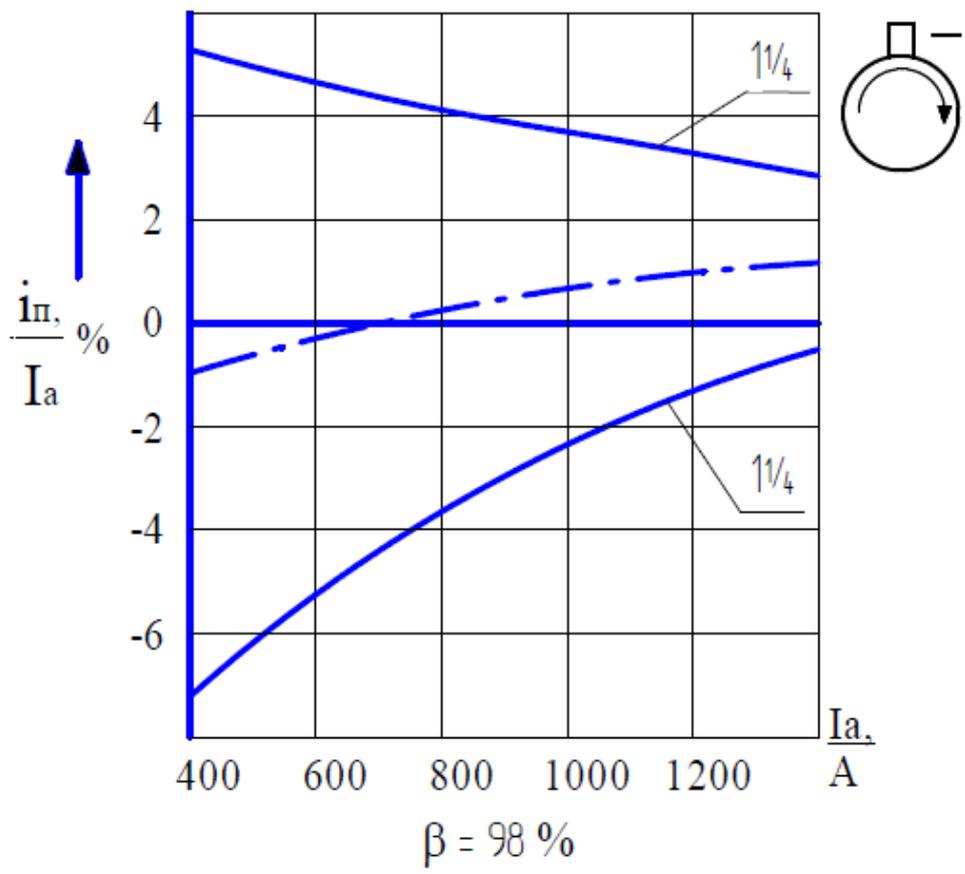


Рисунок 3.9 – ОБР под минусовой щеткой ТЭД с опытными

щеткодержателями (зависимость $\frac{i_p}{I_a} = f(I_a), \%$)

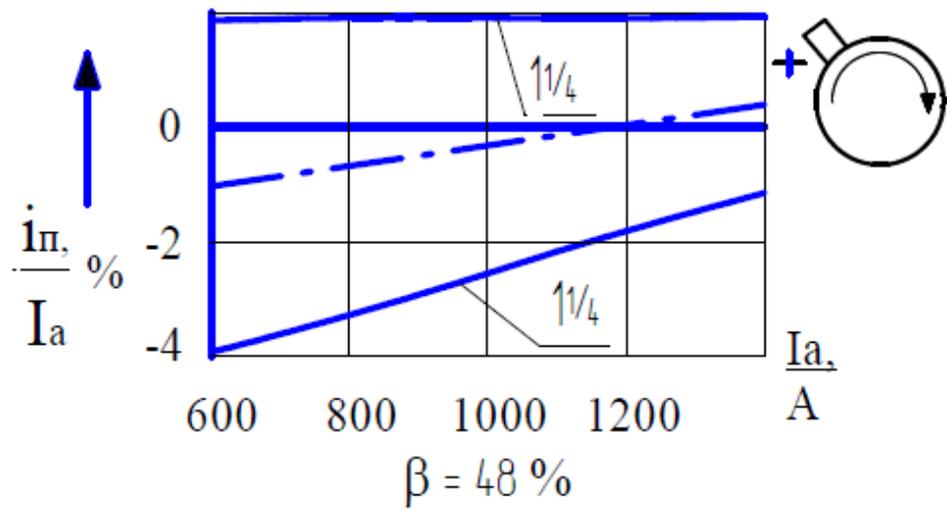
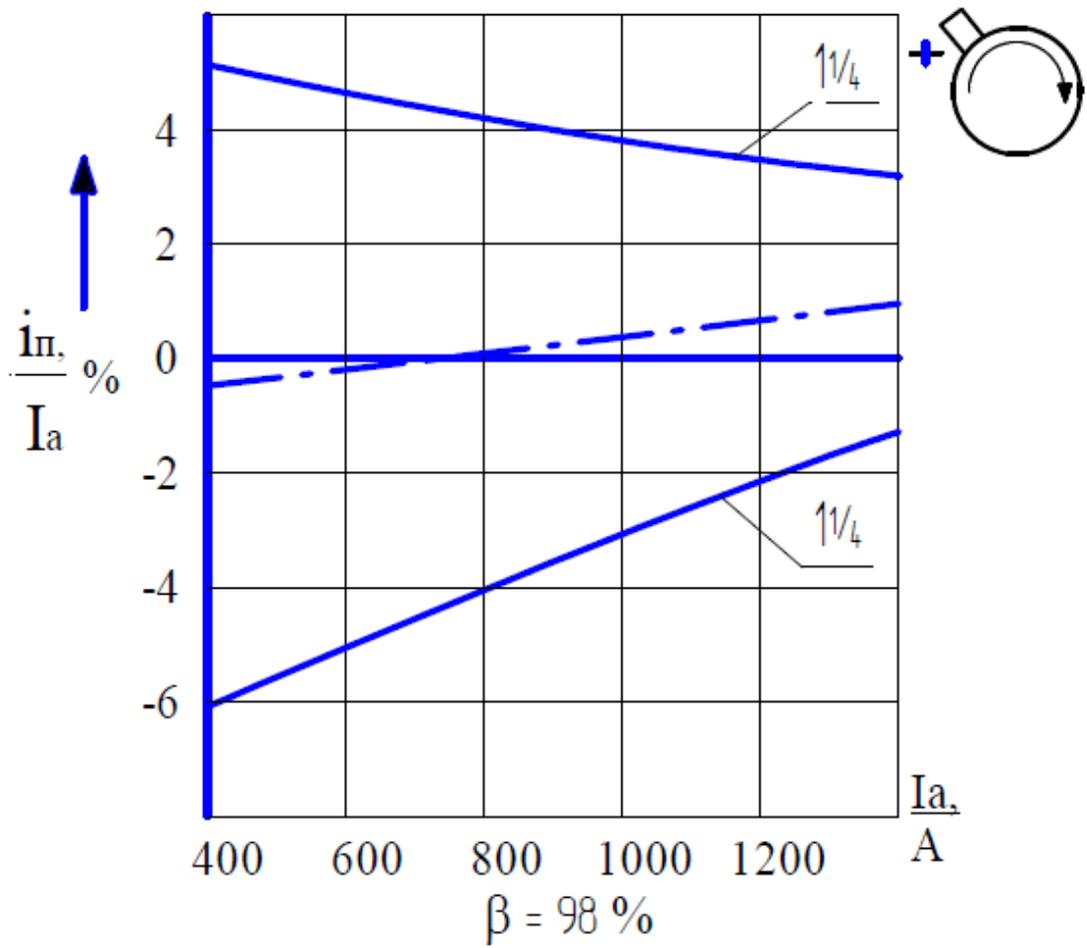


Рисунок 3.10 – ОБР под плюсовой щеткой ТЭД с опытными щеткодержателями (зависимость $\frac{i_n}{I_a} = f(I_a), \%$)

Выводы по главе 3

Уменьшение износа щеток в процессе эксплуатации двигателя с опытными щеткодержателями связано со снижением влияния на искрение механических факторов, так как в процессе эксплуатации под влиянием механических факторов сбегаящие края щеток подвержены сильной вибрации. При этом даже при прямолинейной коммутации обрывается значительный ток, который вызывает повышенный искровой износ щеток. Однако, при опытной конструкции щеткодержателей из-за наличия в кривой тока коммутации пологого участка тока происходит обрыв незначительного тока и этим объясняется снижение искрового износа от влияния механических факторов.

Из экспериментальных данных опытных щеткодержателей следует, что при подпитке дополнительного полюса область безыскровой работы практически мало зависит от тока якоря.

ГЛАВА 4 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для проверки эффективности работы опытных щеткодержателей в условиях эксплуатации, они были смонтированы на тяговом электродвигателе электровоза ВЛ80с №1676 приписки эксплуатационного локомотивного депо СЛД-45 Каменоломни филиала "Южный" ООО "ТМХ-Сервис" Батайск (рисунок 4.1). Поскольку конструкция крепления корпусов опытных щеткодержателей к траверсе, пальцу или кронштейну идентична конструкции серийных щеткодержателей, то монтаж производился по существующей технологии в условиях локомотивного депо (рисунок 4.2).



Рисунок 4.1. Электровоз ВЛ80с №1676



Рисунок 4.2. Щеткодержатель смонтирован на электровозе ВЛ80с №1676

Были проведены эксплуатационные испытания, согласованные с Дирекцией по ремонту тягового подвижного состава и Дирекцией Тяги – филиалами ОАО «РЖД». Методика эксплуатационных испытаний приведена в Приложении 2.

Пробег электровоза за период эксплуатационных испытаний составил 35982 км. Электровоз осуществлял эксплуатационную работу на Северо-Кавказской железной дороге на участках с уклонами до 12 тысячных (например, перегон Сулин-Лесостепь электровоз проследовал в голове поездов, вес которых составил 6591т., 6704т., 6935т.), на Приволжской железной дороге на участках с уклоном до 18 тысячных (например, перегон Сухой Карабулак – Елховка электровоз проследовал в голове поездов, вес которых составил 5979т., 6227т., 5921т., 6257т., 6275т., 6223т., 5870т.). Поезда с весом более 6000 т. считаются тяжеловесными. Согласно данным программы АСУТ-Т-ЮГ, электровоз эксплуатировался с поездами, средний вес которых составил 4026 т., максимальный вес 7271 т.

После проведения испытаний и демонтажа щеток, они были измерены по высоте и определен износ. Данные по средней высоте щетки после испытаний получены измерением всех щеток (36 шт.) на ТЭД и вычислением средней величины. В результате имеются следующие данные: высота новой щетки 57 мм; средняя высота щетки со штатного щеткодержателя после пробега 36,82 мм; средняя высота щетки с опытного щеткодержателя после пробега 46,63 мм. Фотографии щеток после эксплуатационных испытаний приведены на рисунках 4.3, 4.4.

Опытные щеткодержатели обеспечивают снижение износа щеток в среднем на 48%. При этом предполагается, что износ коллектора также был меньше, но он составил незначительную величину, соизмеримую с погрешностью средств измерения [24]. Для контроля величины износа коллектора потребуются более длительные испытания, которые планируется продолжить. Также по результатам дальнейших испытаний необходимо набрать статистику появления круговых огней по коллектору и возможных сбоях работы приборов безопасности из-за неудовлетворительной коммутации и перебросе дуги по коллектору ТЭД.



Рисунок 4.3. Новая щетка, щетка штатного щеткодержателя и щетка с крайнего окна опытного щеткодержателя после испытаний



Рисунок 4.4. Новая щетка, щетка штатного щеткодержателя и щетка с центрального окна опытного щеткодержателя после испытаний

На износ щеток помимо электрических факторов влияет и ряд механических факторов, зависящих от качества настройки усилия нажатия на щетку, от состояния поверхности коллектора и ряда других, поэтому износ щеток на ТЭД неравномерный даже на одном щеткодержателе. В таблице 4.1 приведены данные по фактическому износу каждой щетки после эксплуатационных испытаний [24].

Таблица 4.1 - Измеренные данные высоты щеток ТЭД

Номер ТЭД	Результат осмотра коллектора	№ щеткодержателя	$h_{щ1}$ мм	$h_{щ2}$ мм	$h_{щ3}$ мм
1 (опытный)	Состояние коллектора визуально соответствует техническим нормам, следов повышенного износа или нагара не обнаружено	1	52,55	46,36	45,47
			51,56	45,94	42,81
		2	44,49	45,76	44,83
			45,64	45,87	45,71
		3	52,59	44,14	43,79
			52,63	42,62	44,09
2 (штатный)	Состояние коллектора визуально соответствует техническим нормам, следов повышенного износа или нагара не обнаружено	4	53,77	47,12	53,47
			54,52	46,9	54,09
		5	48,67	44,75	43,51
			49,9	45,5	42,57
		6	48,89	44,15	37,22
			46,66	46,32	33,83
2 (штатный)	Состояние коллектора визуально соответствует техническим нормам, следов повышенного износа или нагара не обнаружено	1	36,74	40,73	36,45
			36,51	35,35	32,98
		2	35,36	37,81	36,8
	34,66	41,49	36,9		

	ра не обнаружено	3	36,71 36,61	40,33 35,55	35,45 35,91		
		4	35,16 34,6	36,83 37,49	40,9 40,4		
		5	37,71 37,51	41,73 38,35	33,45 33,98		
		6	34,31 34,6	36,88 40,48	36,9 36,8		
		3 (штат- ный)	Состояние коллектора визу- ально соответствует техни- ческим нормам, следов по- вышенного износа или нага- ра не обнаружено	1	37,74 37,44	41,7 37,31	33,41 32,9
				2	34,31 34,18	36,87 40,45	37,1 37,3
				3	33,71 34,54	37,73 37,33	36,45 32,98
				4	36,33 326	38,58 41,89	35,81 36,45
5	37,71 37,59			41,71 38,38	36,45 32,98		
6	35,31 35,47			36,81 36,49	39,1 35,11		

Материалы, изложенные в главе 4 получены лично соискателем и опубликованы без соавторов.

Выводы по главе 4

Проведенные исследования и эксплуатационные испытания опытной партии щеткодержателей показали, что при внедрении на электровозах с ТЭД постоянного тока новых конструктивных решений по токосъемному узлу

[24], можно существенно повысить эксплуатационную надежность и получить следующие преимущества: снизить почти вдвое расход щеток; обеспечить увеличение межремонтных пробегов электровозов и ресурс работы коллекторно-щеточного узла ТЭД; обеспечить качественный токосъем с коллекторов ТЭД локомотивов на руководящих подъемах и при вождении тяжеловесных поездов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Аналитический обзор и анализ коммутационных процессов коллекторных ТЭД электровозов позволяет сделать вывод о том, что существуют возможности для улучшения качества коммутации путем изменения параметров и конфигурации щеток.

2. Из анализа физической сущности изменения тока в коммутируемой пассивной секции следует, что:

- средняя скорость изменения тока коммутации секций мало зависит от реального распределения плотности тока в щеточном контакте;
- чем больше или меньше удельное сопротивление скользящего контакта на данном участке контактной дуги щетки, тем на нем медленнее или быстрее изменяется ток коммутации секции;
- при скосе краев щеток, их раздвижке или установке по длине контакта щеток, имеющих различную ширину, в начале и конце кривой тока коммутации секций образуются пологие участки.

3. Разработан новый тип щеткодержателя, существенно улучшающий коммутационный процесс.

4. Исследования, выполненные по определению зоны безыскровой работы ТЭД, свидетельствуют о снижении влияния на искрение механических факторов, так как в процессе эксплуатации под влиянием механических факторов сбегаящие края щеток подвержены сильной вибрации. При опытной конструкции щеткодержателей из-за наличия в кривой тока коммутации пологого участка происходит обрыв незначительного тока и этим объясняется снижение искрового износа от влияния механических факторов.

5. Проведенные эксплуатационные испытания ТЭД постоянного тока на электровозе ВЛ80с №1676 показали, что новые щеткодержатели позволя-

ют существенно повысить эксплуатационную надежность и получить следующие преимущества: снизить почти вдвое расход щеток; обеспечить увеличение межремонтных пробегов электровозов и ресурс работы коллекторно-щеточного узла ТЭД; обеспечить качественный токосъем с коллекторов ТЭД локомотивов на руководящих подъемах и при вождении тяжеловесных поездов.

6. Выполненные исследования имеют перспективу дальнейшей разработки темы в плане исследования не только износа щеток коллекторных ТЭД, но и поверхности коллектора и оценки устойчивости новой конструкции щеткодержателя к образованию круговых огней.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 **Арнольд, Е.** Машины постоянного тока: Теория и исследование / Е. Арнольд, И. Ла-Кур. – М.: Гостехиздат, 1931. – 496 с.
- 2 **Рихтер, Р.** Электрические машины. Т.1 / Р. Рихтер. – М.: ОНТИ, 1935. – 597 с.
- 3 **Дрейфус, Л.** Коммутация больших электрических машин / Л. Дрейфус. – Стокгольм, 1929. – 228 с.
- 4 **Вегнер, О.Г.** Теория и практика коммутации машин постоянного тока / О.Г. Вегнер. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 272 с.
- 5 **Курбасов, А.С.** Основы энергетической теории коммутации машин постоянного тока / А.С. Курбасов // Электричество. – 1962. – № 7. – С. 24–27.
- 6 **Курбасов, А.С.** Об энергетической теории коммутации / А.С. Курбасов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1962. – № 9. – С. 1076–1083.
- 7 **Карасев, М.Ф.** Оптимальная коммутация машин постоянного тока / М.Ф. Карасев, В.П. Беляев, В.Н. Козлов [и др.]. – М.: Транспорт, 1967. – 180 с.
- 8 **Карасев, М.Ф.** Дальнейшее развитие теории оптимальной коммутации машин постоянного тока / М.Ф. Карасев, В.П. Беляев, В.Н. Козлов [и др.] // Науч. тр. Т. 78. – Омск: ОМИИТ. – 1967. – 175 с.
- 9 **Рихтер, Р.** Обмотки якорей машин постоянного и переменного тока / Р. Рихтер. – М.: ОНТИ, 1933. – 126 с.
- 10 **Хвостов, В.С.** Электрические машины: машины постоянного тока / В.С. Хвостов. – М.: Высш. школа, 1988. – 336 с.
- 11 **Дрейфус, Л.** Коммутация мощных машин постоянного тока / Л. Дрейфус. – Стокгольм, 1954. – 262 с.
- 12 **Толкунов, В. П.** Теория и практика коммутации машин постоянного тока / В.П. Толкунов. – М.: Энергия, 1974. – 224 с.

13 **Авилов, В.Д.** Исследование коммутации коллекторных машин с составными щетками / В.Д. Авилов // Мат. 4-й Всесоюз. конф. по коммутации электрических машин. – Омск. – 1964. – С. 47–50.

14 **Карасев, М. Ф.** Исследование коммутации машин постоянного тока с составными щетками / М.Ф. Карасев, В.Д. Авилов // Тр. ОМИИТа. – 1968. – Т. 88. – Вып. 2. – С. 80–86.

15 **Карасев, М. Ф.** Особенности коммутации машин постоянного тока с составными щетками / М.Ф. Карасев, В.Д. Авилов // Тр. ОМИИТа. – 1968. – Т. 88. – Вып. 2. – С. 87–92.

16 **Савельева, Е. Н.** Коммутация машин постоянного тока с составными щетками: автореф. дис. канд. техн. наук / Е.Н. Савельева. – Омск, 1985. – 27 с.

17 **Сипайлов, Г.А.** Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков. – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.

18 **Прусс-Жуковский, В.В.** Влияние типа якорной обмотки машины постоянного тока на коммутацию сопротивлением / В.В. Прусс-Жуковский // Тр. ЛПИ. – 1953. – № 3. – С. 169–185.

19 **Толкунов, В. П.** О законе изменения тока в коммутируемых секциях при различных типах обмотки якоря / В.П. Толкунов // Вестник ХПИ. – 1966. – № 9. – С. 59–65.

20 **Бордаченков, А. М.** Коллекторно-щеточный узел тяговых электрических машин локомотивов / А.М. Бордаченков, А.М. Гнездинов. – М.: Транспорт, 1974. – 157 с.

21 **Омельяненко, В. Н.** Теоретические и экспериментальные исследования «зедриности» коллектора машины постоянного тока предельной мощности: автореф. дис. канд. техн. наук / В.Н. Омельяненко. – Харьков, 1972. – 36 с.

22. **Девликамов, Р.М.** Новые элементы теории токосъема с коллектора и рекомендации по их использованию на практике: монография / Р.М. Девликамов. – М.: Маршрут, 2011. – 221 с.

23. **Петрушин, А.Д.** Реверс тока в коммутируемых секциях обмотки якоря коллекторной электрической машины/ А.Д. Петрушин, Р.М. Девликамов, Д.Н. Хомченко // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014, №11. С. 3-6.

24. **Хомченко, Д.Н.** Эксплуатационные испытания тяговых двигателей постоянного тока с измененной конфигурацией щеток / Д.Н. Хомченко // Вестник РГУПС. – Ростов н/Д: РГУПС, 2015 – № 3. – С. 19-22.

25. **Хомченко, Д.Н.** Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей/ Д.Н. Хомченко // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2014». – Ростов н/Д: РГУПС, 2014 – С. 142-144.

26. **Хомченко, Д.Н.** Совершенствование конструкции щеткодержателей тяговых электродвигателей/ Д.Н. Хомченко, Р.М. Девликамов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2013». – Ростов н/Д: РГУПС, 2013 – С. 147-149.

27. **Хомченко, Д.Н.** Улучшение качества коммутации тяговых электродвигателей локомотивов на основе разработки конструкций щеткодержателей/ Д.Н. Хомченко //Труды РГУПС. – Ростов н/Д: РГУПС, 2013 – № 2 (23). – С. 120-123.

28. **Хомченко, Д.Н.** Новая конструкция щеткодержателей для электровазов постоянного и переменного тока/ Д.Н. Хомченко, А.Е. Черешенко //Труды РГУПС. – Ростов н/Д: РГУПС, 2014 – № 2 (28). – С. 25-31.

29. **Патент № 2548908** Российская федерация, МПК H01R39/40. Щеткодержатель / А.Д. Петрушин, Р.М. Девликамов, Д.Н. Хомченко - заявители. Патентообладатель - ОАО "РЖД". - №2014103301; заявл. 31.01.2014; опубл. 20.04.2015.

30. Патент № 2551122 Российская федерация, МПК H02RK13/00. Щеткодержатель / Петрушин, А.Д., Девликамов Р.М., Хомченко Д.Н. - заявители. Патентообладатель - ОАО "РЖД". - №2014103300; заявл. 31.01.2014; опубл.20.05.2015.

31. Хомченко, Д.Н. Новая конструкция щеткодержателей для электровозов постоянного и переменного тока/ Д.Н. Хомченко, А.Е. Черешенко // Труды международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России». Часть 1. – Ростов н/Д: РГУПС, 2015 – С. 244-247.

32. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

33. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.

34. ГОСТ 10159-79. Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний.

35. Бочаров, В.И. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины /В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, А.Л. Курочка и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.

36. Данько, В.Г. Вопросы создания двигателей постоянного тока мощностью 10 МВт с малоинерционным якорем / В.Г. Данько, В.С. Кильдышев, В.И. Милых и др. Динамические режимы работы электрических машин и электропри-водов // Тезисы докладов 4-ой Всесоюзной научно-технической конференции. – Днепродзержинск, 1985. – Ч.1. – С.6-7.

37. Бочаров, В.И. Беспазовые тяговые двигатели постоянного тока. – М.: Энергия, 1976.

38. Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин – М.: Транспорт, 1987. 536с.

39. **Девликамов, Р.М.** Прогнозирование коммутационного искрения тяговых электродвигателей / Р.М. Девликамов, В.М. Олейник, Р.И. Аликин // Тез. докладов VII Всесоюзной научн. тех. конференции: Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране. – Новочеркасск, 1991. – С.91 – 93.
40. **Курочка, А.Л.** Совершенствование конструкции и улучшение характеристик электродвигателя стрелочного перевода / А.Л. Курочка, М.Н. Пятых, Р.М. Девликамов и др // Автоматика, телемеханика и связь. – 1992. – №4. – С.2 – 4.
41. **Абусеридзе, З.В.** Электродвигатель стрелочного перевода с четырехполюсной магнитоэлектрической системой возбуждения / З.В. Абусеридзе, Р.М. Девликамов // ВИНТИ: Наука, техника, управление. – 2005. – №5 – С. 11 – 12.
42. **Абусеридзе, З.В.** Оптимизация коммутационных параметров электродвигателей стрелочного перевода / З.В. Абусеридзе, Р.М. Девликамов // ВИНТИ: Наука, техника, управление. – 2005. – №11 – С. 20 – 22.
43. **Девликамов, Р.М.** Прогнозирование искрения в щеточном контакте коллекторной электрической машины и оценка ее коммутационной надежности // Изв. вузов. Электромеханика. – 2007. – №1. – С.20 – 22.
44. **Андросов, Н.Н.** Совершенствование методики расчета коммутации машин постоянного тока / Н.Н. Андросов, В.И. Седов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1983. - №3. – С.62-72.
45. **Битюцкий, Н.Б.** Новые методы расчета и наладки коммутации машин постоянного тока. – Новочеркасск: Ред. журн. «Изв. Вузов. Электромеханика», 2003. – 226 с.
46. **Авилов, В.Д.** Диагностирование и настройка коммутации тяговых и других электрических машин / В.Д. Авилов, В.П. Беляев и др.; под ред. В.Д. Авилова. – Омск: ОГУПС, 2000. – 134 с.

47. **Девликамов, Р.М.** Об электромагнитных причинах искрообразования в щеточном контакте машин постоянного тока // Вестник ОАО «Всерос. н.-и. и проект.-констр. ин-та электровозостроения» (ОАО «ВЭлНИИ»). – №3(52). – Новочеркасск. – 2006. – С.48 – 61.

48. **Девликамов, Р.М.** О теориях коммутации машин постоянного тока / Р.М. Девликамов, З.В. Абусеридзе // ВИНТИ: Наука, техника, управление. – 2005. – №7. – С.12 – 20.

49 Электронный ресурс.

http://scbist.com/zheldor/elektrovoz/elektrovoz_8.html

50 **Курбасов, А.С.** Повышение работоспособности тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1977. – 223с.

Приложение 1

СОГЛАСОВАНО

Заместитель Директора по качеству
филиала ОАО «ЖЕЛДОРРЕММАШ»
Ростовского-на-Дону
Электровозоремонтного завода

Мустафин А.Ш.

24 сентября 2014 года



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВПО РГУПС

А.Н. Гуда

24 сентября 2014 г.



АКТ

предварительных и приемочных испытаний опытных щеткодержателей

Испытания опытных щеткодержателей были проведены на испытательной станции Ростовского-на-Дону ЭРЗ - филиала ОАО "Желдорремаш".

Щеткодержатели разработаны ФГБОУ ВПО РГУПС в рамках НТР с ОАО "РЖД" (шифр 3.085) по теме «Разработка, изготовление и эксплуатационные испытания щеткодержателей тяговых электродвигателей локомотивов для улучшения качества коммутации с целью увеличения межремонтных пробегов и ресурса работы их коллекторно-щеточного узла». Опытные щеткодержатели разработаны и изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201 и ОСТ 32.181. Конструкция опытных щеткодержателей отвечает требованиям стандартов безопасности труда по ГОСТ 12.1.004. Опытные щеткодержатели соответствуют требованиям безопасности по ГОСТ 12.1.007, ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.018, ГОСТ 12.4.021. Конструкция опытных щеткодержателей максимально унифицирована с серийными щеткодержателями.

Испытания проводились на двигателе НБ514 № 7100, якорь № 1120 в часовом режиме при номинальном токе. В конце испытаний ток был увеличен в 1,4 раза от номинального значения в течение 15 секунд.

Опытные щеткодержатели подтвердили свою работоспособность в номинальном режиме (ток 905 А) и в режиме перегрузки по току (ток 1265 А, напряжение 1240 В). В номинальном режиме работы двигателя искрение отсутствовало (темная коммутация). В режиме перегрузки по току искрение на опытных щеткодержателях визуально было меньше, чем на стандартных.

Опытные щеткодержатели могут быть допущены к эксплуатационным испытаниям.

Начальник испытательной станции ОК

А.С. Янушка

Приложение 2

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВПО РГУПС

_____ А.Н. Гуда

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. Главного инженера ЦТР

_____ О.В. Балакирев

ПРОГРАММА и МЕТОДИКА

эксплуатационных испытаний опытных щеткодержателей

29 октября 2014 года

г. Ростов-на-Дону

1. Программа испытаний

Испытаниям подвергаются опытные щеткодержатели, разработанные ФГБОУ ВПО РГУПС в рамках НТР с ОАО "РЖД" (шифр 3.085) по теме «Разработка, изготовление и эксплуатационные испытания щеткодержателей тяговых электродвигателей локомотивов для улучшения качества коммутации с целью увеличения межремонтных пробегов и ресурса работы их коллекторно-щеточного узла». Опытные щеткодержатели разработаны и изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201 и ОСТ 32.181. Конструкция опытных щеткодержателей отвечает требованиям стандартов безопасности труда по ГОСТ 12.1.004. Опытные щеткодержатели соответствуют требованиям безопасности по ГОСТ 12.1.007, ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.018, ГОСТ 12.4.021. Конструкция опытных щеткодержателей максимально унифицирована со штатными щеткодержателями.

Монтаж опытных щеткодержателей осуществляется в депо приписки электровоза в период текущего ремонта первого объема (ТР1). После монтажа выполняются следующие работы:

- визуальный осмотр поверхности коллектора;
- измерение высоты щеток;
- измерение диаметра коллектора или параметра, характеризующего износ коллектора.

Длительность эксплуатационных испытаний определяется установленным пробегом или временем прибытия электровоза до следующего ТР-1 (согласно распоряжения №СКАВ-246/р от 22 марта 2013 года Филиала ОАО «РЖД» СКЖД) межремонтным пробегом (27500 км.) или по времени (3 месяца, если техническое обслуживание ТО-3 не производилось).

После выполнения электровозом установленного пробега и прибытия в депо для проведения ТР-1 (через 3 месяца или ранее после пробега в 27500 км) с опытными щеткодержателями на тяговом двигателе производятся следующие работы:

- визуальный осмотр поверхности коллектора;
- измерение высоты щеток;
- измерение износа коллектора.

2. Методика испытаний

На электровоз, номер которого согласован с Дирекцией тяги, монтируются опытные щеткодержатели на тяговый электродвигатель НБ-418 в количестве 6 штук. Регламент работ по монтажу опытных щеткодержателей не отличается от регламента работ по монтажу штатных щеткодержателей, так как конструкция опытных щеткодержателей максимально унифицирована с серийными штатными щеткодержателями.

Отличительной особенностью опытных щеткодержателей является измененная ширина крайних окон под установку щеток рисунок П1.

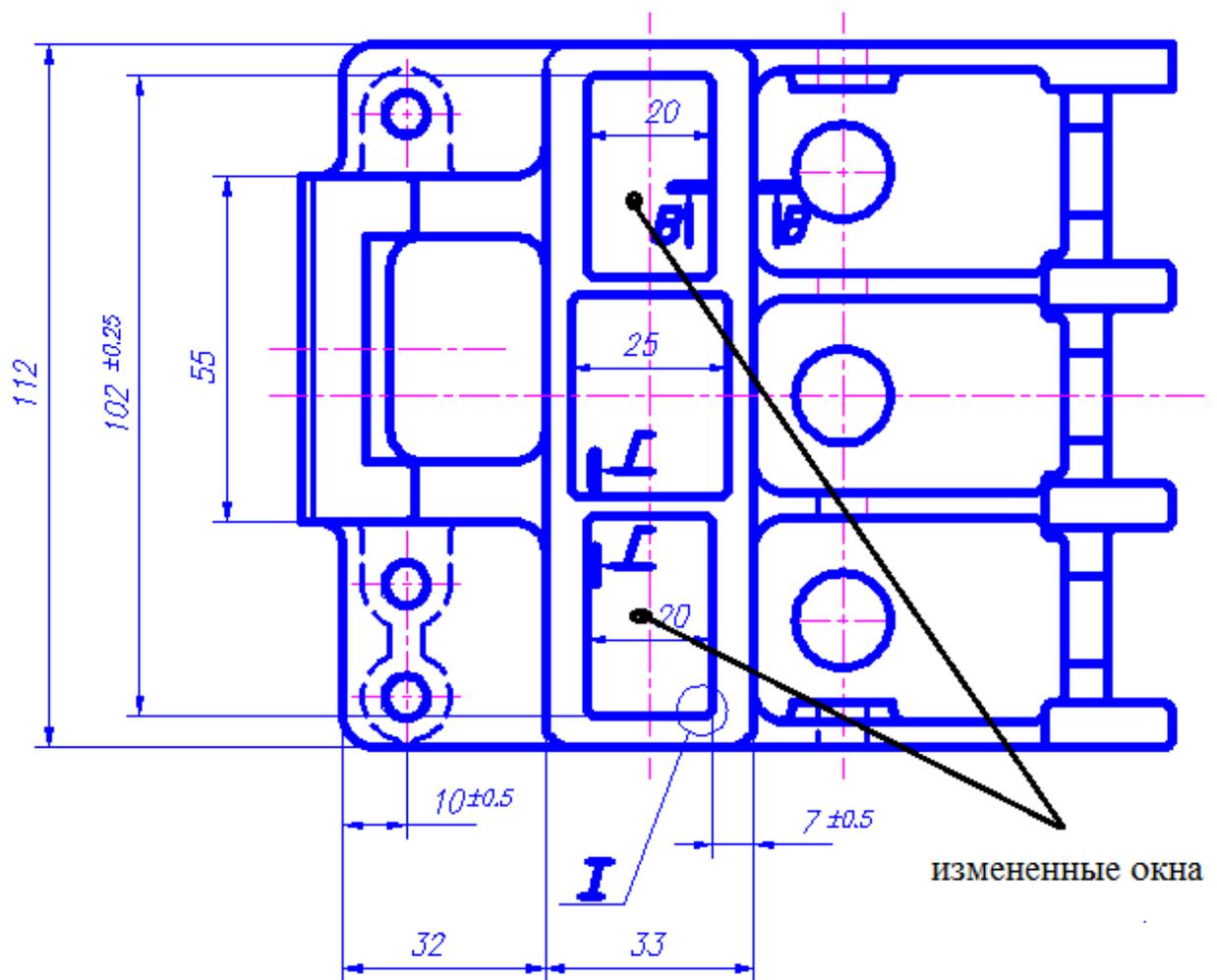


Рисунок П1. Опытный щеткодержатель

На рисунке П2 показан фрагмент работ по монтажу опытного щеткодержателя. На рисунке П3 показан опытный щеткодержатель, установленный на тяговый электродвигатель.



Рисунок П2. Монтаж опытного щеткодержателя

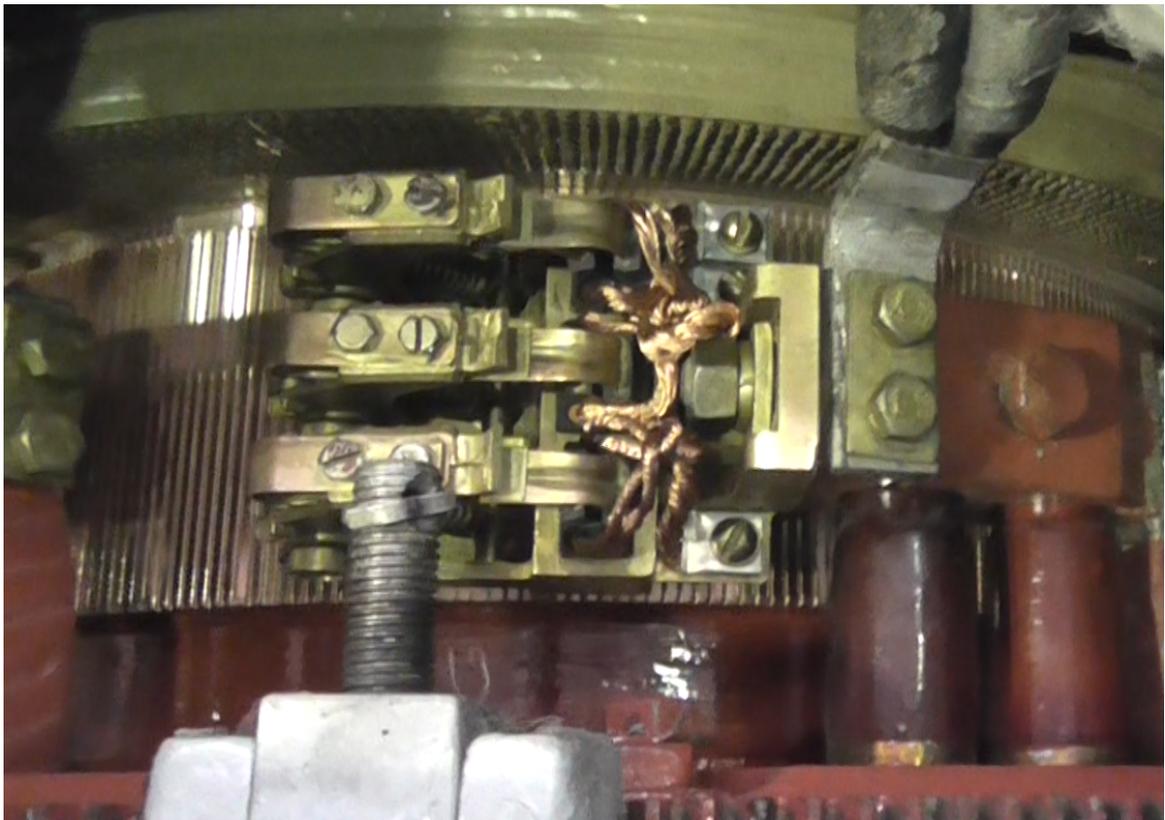


Рисунок П3. Опытный щеткодержатель смонтирован

Перед началом эксплуатационных испытаний после монтажа опытных щеткодержателей на тяговом электродвигателе производят следующие контрольно-измерительные работы.

2.1 Осматривают поверхность коллектора и отмечают его состояние в журнале (приложение 1).

2.2. Измеряют и отмечают в журнале фактическую высоту щеток $h_{щ}$ (после притирки к коллектору).

2.3. Измеряют диаметр коллектора D_k или расстояние Δh между нижней гранью окна щеткодержателя и поверхностью коллектора. Данные заносятся в журнал.

2.4. Действия по п.п. 2.1, 2.2 и 2.3 повторяют еще для двух тяговых двигателей со штатными щеткодержателями.

После установленного пробега и прибытия электровоза в депо для проведения TP-1 с опытными щеткодержателями на тяговом двигателе производят следующие контрольно-измерительные работы.

2.5. Осматривают поверхность коллектора и отмечают его состояние в журнале, обращая внимание на заволакивание поверхности медью, подгар щеток и т.п. Данные осмотра заносятся в журнал.

2.6. Измеряют и отмечают в журнале фактическую высоту щеток.

2.7. Измеряют диаметр коллектора или расстояние Δh между нижней гранью окна щеткодержателя и поверхностью коллектора. Данные заносятся в журнал.

2.8. Действия по п.п. 2.5, 2.6 и 2.7 повторяют еще для двух тяговых двигателей со штатными щеткодержателями.

Приложение 3

Специализированная форма № ФОУ – 26

Исполнитель	ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения» г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного ополчения, д.2 . Тел. (863)245-06-13, факс (863)255-32-83	Форма по ОКУД	Код
		по ОКПО	0306838 01116006
Заказчик	ОАО «РЖД» Эксплуатационное локомотивное депо ТЧЭ-6 - Батайск - структурное подразделение Северо-Кавказской дирекции тяги - структурного подразделения Дирекции тяги - филиала ОАО «РЖД»	по ОКПО	00083262
		по ОКПО	2407

(подразделение балансодержатель)

АКТ №
от 24 июня 2015г.
ввода в эксплуатацию опытной партии щеткодержателей
по договору от 03 декабря 2013 г. № 1177,
Дополнительному соглашению №1 от 30.12.2014 г.

Работа: «Разработка, изготовление и эксплуатационные испытания щеткодержателей тяговых электродвигателей локомотивов для улучшения качества коммутации с целью увеличения межремонтных пробегов и ресурса работы их коллекторно-щеточного узла», шифр работы 3.085, категория НИОКР

Мы, нижеподписавшиеся, представители исполнителя федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО РГУПС) и представители заказчика эксплуатационного локомотивного депо Батайск - структурного подразделения Северо-Кавказской дирекции тяги - структурного подразделения Дирекции тяги - филиала ОАО «РЖД» составили настоящий акт в том, что опытная партия щеткодержателей в количестве 50 штук введена в эксплуатацию в эксплуатационном локомотивном депо Батайск - структурном подразделении Северо-Кавказской дирекции тяги - структурном подразделении Дирекции тяги - филиала ОАО «РЖД».

Приложение:

1. Конструкторская документация на опытную партию щеткодержателей.

(перечень передаваемых документов)

От
ФГБОУ ВПО «Ростовский
государственный университет путей
сообщения»
(наименование исполнителя)

От
Северо-Кавказской дирекции тяги –
структурного подразделения Дирекции тяги
– филиала ОАО «РЖД»
(наименование подразделения ОАО «РЖД»
Дирекция тяги)

Первый проректор
ФГБОУ ВПО РГУПС
А.В. Челохьян

Гл. инженер В.Б. Мыльников

Начальник депо А.В. Кашубин
(должность) (подпись) (расшифровка подписи)

Руководитель договора
М.П. А.Д. Петрушин

Гл. инженер депо Ю.В. Путилин
(должность) (подпись) (расшифровка подписи)

М.П.



Приложение 4

В соответствии с "Положением о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842)": "При использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных соискателем ученой степени лично и (или) в соавторстве, соискатель ученой степени обязан отметить в диссертации это обстоятельство" ниже приведены сведения о разделении результатов научных работ, которые выполнены в соавторстве.

Издания, рекомендованные ВАК:

Петрушин, А.Д. Реверс тока в коммутируемых секциях обмотки якоря коллекторной электрической машины/ А.Д. Петрушин, Р.М. Девликамов, Д.Н. Хомченко // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014, №11. С. 3-6.

Доля соискателя в данной публикации оценивается в 1/3 текста публикации. Основной вклад - это положение о том, что рациональная кривая тока коммутации секции должна в конце переходного процесса иметь пологий участок с малым током, что обеспечит меньшее искрение и износ щеток и коллектора.

Другие издания:

Хомченко, Д.Н. Новая конструкция щеткодержателей для электровозов постоянного и переменного тока/ Д.Н. Хомченко, А.Е. Черешенко //Труды РГУПС. – Ростов н/Д: РГУПС, 2014 – № 2 (28). – С. 25-31.

Доля соискателя в данной публикации оценивается в 1/2 текста публикации.

В данной публикации соискателем дано описание конструктивных особенностей щеткодержателей для электровозов постоянного и переменного

тока, приведены теоретические положения, объясняющие предложенные конструкции.

Хомченко, Д.Н. Новая конструкция щеткодержателей для электровозов постоянного и переменного тока/ Д.Н. Хомченко, А.Е. Черешенко // Труды международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России». Часть 1. – Ростов н/Д: РГУПС, 2015 – С. 244-247.

Доля соискателя в данной публикации оценивается в 1/2 текста публикации.

Патенты:

7. Патент № 2548908 Российская федерация, МПК H01R39/40. Щеткодержатель / Петрушин, А.Д., Девликамов Р.М., Хомченко Д.Н. - заявители. Патентообладатель - ОАО "РЖД". - №2014103301; заявл. 31.01.2014; опубл.20.04.2015.

Доля соискателя в данном патенте оценивается в 1/3 текста описания патента, в том числе формула изобретения.

8. Патент № 2551122 Российская федерация, МПК H02RK13/00. Щеткодержатель / Петрушин, А.Д., Девликамов Р.М., Хомченко Д.Н. - заявители. Патентообладатель - ОАО "РЖД". - №2014103300; заявл. 31.01.2014; опубл.20.05.2015.

Доля соискателя в данном патенте оценивается в 1/3 текста описания патента.