

К вопросу о влиянии физико-химических процессов на надежность узла скользящего токосъема электрических машин*

Изотов С.А., Изотов А.И., Фоминых А.А.
Вятский государственный технический университет
г. Киров, Российская Федерация
usr00151@vyatsu.ru

Аннотация. Электрические машины постоянного тока имеющие широкое применение в узлах и механизмах современного оборудования и устройствах работают в различных климатических условиях. Эти условия зачастую определяют особенности эксплуатации электрических машин, ремонтные - профилактические мероприятия. Во многом надежность электрических машин постоянного тока определяется узлом скользящего токосъема (УСТ), в котором токоведущие щетки находятся в динамическом и статическом контакте с пластинами металлического коллектора или кольца. Физико-механические и химические процессы происходящие на границе сопряжения контактирующих противотел определяют коммутационные процессы и надежность (УСТ). Целью статьи является анализ и исследование влияния вероятных физико-химических факторов на эксплуатационную надежность узла скользящего токосъема электрических машин. Результаты научно-практической работы позволяют определить мероприятия, направленные на устранения негативного влияния неблагоприятных физико-химических факторов окружающей среды на электрические машины.

Ключевые слова: электрическая машина, щетка, дисульфид молибдена, твердая смазка, узел скользящего токосъема, износ коллектора.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины имеющие в узле токосъема щеточные материалы могут находиться в различных эксплуатационных условиях, отличающихся различным диапазоном химического состава атмосферы, температуры и режимами работы.

В этих условиях циклические режимы (простои, работа на холостом ходу и под нагрузкой) надежность работы электрических машин во многом будет определяться физико-химическими процессами протекающими в узле скользящего токосъема (УСТ).

В УСТ электромашины могут протекать следующие виды коррозионных явлений: химическая коррозия (в основном газовая); собственно электрохимическая коррозия; коррозионная эрозия – разрушение металла при взаимном истирающем воздействии со щетками иногда называемая фреттинг-коррозия [1]; контактная коррозия металла коллекторных пластин или колец находящихся в сочленении с углеродистыми щетками и имеющие разные электродные потенциалы.

Протекание электрохимических процессов связано с поверхностной ионизацией металла в локализованном на

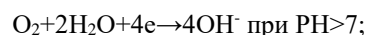
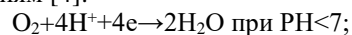
металлической поверхности водно-пленочном электролите. При этом могут образовываться различные по своей структуре продукты реакции. Они могут быть рыхлыми, плотными, не сплошными, обводненными и т.п. [2].

В условиях рабочих режимов электрических машин в УСТ велика доля коррозионной эрозии. Коррозионная эрозия (коррозионно-механический износ) может приводить к разрушению поверхности твердого тела, в данном случае, металла, вызываемый механическим истирающим воздействием другого твердого тела (углеродистая щетка) при одновременном действии коррозионной среды причем суммарный синергетический эффект воздействия двух факторов (электролит, механическое воздействие) может быть больше каждого в отдельности. Скорость фреттинг-коррозии (коррозионной эрозии) будет определяться природой трущихся пар, коррозионной активностью среды, амплитудой проскальзывания, контактными давлением, числом и частотой циклов относительных смещений контактирующих деталей, степенью прилегания сопряженных поверхностей, температурой в зоне контакта [2].

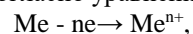
В общем случае необходимым условием протекания атмосферной коррозии является наличие на поверхности металла коллектора пленки воды, толщина которой в значительной степени зависит от влагосодержания воздуха [3]. В нейтральной водно-пленочной среде возникает традиционный процесс атмосферной коррозии, окислительными агентами в которой являются молекулы воды и молекулярный кислород.

В кислой атмосфере, особенно насыщенной парами SO_2 , NO и NO_2 в пленке влаги на поверхности металлического коллектора в качестве дополнительного окислительного агента начинает активно проявлять себя ион гидроксония – H_3O^+ (H^+).

Таким образом, основные окислители (H_2O , O_2 , H_3O^+) коррозионного процесса восстанавливаются за счет высвобождающихся электронов при ионизации металла согласно уравнениям [4]:



Ионизация металла (анодная реакция коррозионного процесса) протекает согласно уравнению:



где Me – коллекторный металл (кольцо).

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (ICIE-2019), <http://icie-rus.org>

При этом протекание обеих реакций сопряженного процесса коррозии может приводить к растворимым и нерастворимым продуктам, имеющим различную адгезию к металлической основе в виде коллекторных пластин или контактных колец.

Для электрохимической коррозии характерно локальное разделение сопряженных реакции ионизации металла и восстановления окислительного компонента на микро-рельефе металла и определяется его структурной неоднородностью, например, наличием примесей, при этом эти сопряженные реакции будут пространственно разделены на микропрофиле металла.

Степень заторможенности во времени (кинетика процесса) катодной (восстановления окислителей) или анодной реакции (ионизация металла) коррозионного процесса будет лимитировать общую скорость протекания электрохимического процесса коррозии, протекающей при компрессионном потенциале (потенциале коррозии). Потенциал коррозии обусловлен влиянием обеих реакции, и возникает, при “навязывании” каждой реакции своего потенциала металлической поверхности.

Интенсивность электрохимического коррозионного процесса обуславливается толщиной пленки влаги на поверхности металла коллектора, зависящей не только от относительной влажности воздуха, но и во многом определяется длительностью увлажнения [4].

Известно, что конденсированные пленки влаги по толщине и условиям образования разделяются на адсорбционные и фазовые [2].

Адсорбционные пленки – тончайшие пленки способные образовываться при относительной влажности воздуха от 30%, в отсутствие осадков и росы. В сухом воздухе (ниже 30%) адсорбционный слой влаги может быть соизмерим с толщиной молекулярного слоя воды. Адсорбционные водные пленки, систематизированные как (“влажная” коррозия) – тончайшие пленки влаги от нескольких десятков молекулярных слоев лежат в пределах толщин от 10^{-5} до 10^{-3} мм и связаны Ван-дер Ваальсовыми связями с поверхностью трения и непосредственно и между своими молекулярными монослоями. Адсорбционная пленка может служить основой для формирования так называемой фазовой водной пленки и зависит при прочих равных условиях от химической активности металла.

Следует, однако, отметить, что к “влажной” коррозии относятся также пленки воды, образовавшиеся в ходе капиллярной и химической конденсации [2]. Капиллярная конденсация зависит от микро-рельефа корродирующей поверхности и увеличивается с ростом пористости и шероховатости последней. Поэтому несомненно, что этот вид конденсации в условиях существования пористого углеродистого слоя на контактной поверхности металла коллектора или кольца достаточно весом. Химическая конденсация обусловлена гигроскопичностью образующихся продуктов коррозии и других химических соединений, попадающих на поверхность металла в процессе эксплуатации при износе или из примыкающего воздушного пространства.

Фазовые пленки [4] (“мокрая коррозия”) – толстые пленки конденсированной влаги, как правило, слабо связаны с металлической поверхностью. Основным источником этих пленок являются туманы, оттепели, дожди,

роса, туманы. Их возникновение и локализация на поверхности контактирующих противотел связано с нахождением щеточно-коллекторного узла в незащищенных или недостаточно защищенных условиях естественной атмосферы (неотапливаемый бокс, навес и т.д.) и в сильной степени обуславливается перепадом температур.

Атмосферная коррозия также может протекать под незначительными молекулярными слоями влаги (относительная влажность воздуха, как правило, до 50%) и толщине пленки до 10^{-5} мм и является “сухой” атмосферной коррозией. Отмечается [4], что эта разновидность коррозии характеризуется поверхностным окислением металла по химическому механизму при взаимодействии какого-либо реагента в газообразном виде с поверхностью металла. Процессы “сухой” атмосферной коррозии в условиях естественных температур не оказывают существенного влияния на состояние поверхности, скорость процесса низкая, причем окисление металлической поверхности мало.

Следует, однако, отметить, что при эксплуатационном повышении температуры в зоне контакта УСТ вследствие разогрева трущихся поверхностей противотел или переходных процессов, происходит активное испарение влаги и реализуется другая разновидность химической коррозии – газовая, основным продуктом коррозионного процесса которой являются оксидные пленки [4]. Состояние данных оксидных пленок подчиняется условию сплошности Пиллинга-Бедворса. Этот вид коррозионного процесса наиболее характерен для эксплуатации электрических машин в регулируемой атмосфере (отапливаемых и вентилируемых условиях). Температура и газовый состав рабочей воздушной среды в этом случае будет определять степень плотности и защитной способности пленки от дальнейшего окисления металла, и, несомненно, трибологические свойства данной поверхности скольжения.

Скорость процесса газовой коррозии во многом может определяться сорбцией пористой углеродистой пленкой кислых газов и последующим разрушением образующимися кислотами (даже при незначительном влагосодержании) защитной оксидной части политурной пленки. При этом фронт разрушения металла кислородом воздуха через эту не сплошную пленку направлен вглубь его объема. Последнее в условиях дополнительного механического износа в условиях вращения может приводить к сильной коррозионной эрозии.

Осаждаемые на межфазной границе мелкодисперсные частицы, особенно твердого состояния (пыль) имеющие кислотный характер из-за сорбции кислой газовой среды также влияют на скорость поверхностной коррозии [2]. Причем следует ожидать, что эти процессы значительно ускоряются при диссипации тепла от локальных зон нагрева в соответствии теплопроводностью сопряженных материалов и сред.

В случае нахождения электрических машин в слабо-защищенных от воздушной среде условиях, скорость атмосферной коррозии при которой появляется сплошная пленка влаги на поверхности металла увеличивается особенно по достижении некоторой определенной относительной влажности воздуха (критической влажности, в среднем соответствующей относительной влажности равной 50-70%).

Критическая влажность зависит как от природы металла, так и от степени поверхностных загрязнений, так как последние могут быть гигроскопичными и содержат большие количества влаги (химическая конденсация).

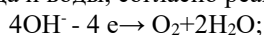
Ниже определенного уровня относительной влажности (критической влажности) пленка влаги тонка и в большинстве случаев скорость электрохимического процесса коррозии не столь значительна. Следует отметить, что поскольку эксплуатации электрической машины осуществляется в режиме вращения-простой, масса влаги на границе раздела контактирующих тел будет меняться циклически, при этом процесс коррозии будет контролироваться как электрохимическим, так и химическим механизмом. Их соотношение будет определяться количеством тепла выделяющегося в результате трения скольжения и переходных процессов, а также интенсивностью влагопроникновения в воздушные зазоры контактного пространства УСТ.

Процессы коммутации в УСТ во многом зависят также от переходного сопротивления на границе трения [5]. Величина относительной влажности при этом является решающим фактором определяющим значение поверхностной электропроводности. Особенно резко уменьшение поверхностного электросопротивления наблюдается при значениях относительной влажности, превышающей 50%.

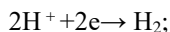
Таким образом, вода в присутствии адсорбционных или адсорбционно-фазовых пленок наиболее сильно проявляет свойства электролита при критической влажности, что имеет решающее значение для процесса коррозии развивающегося по электрохимическому механизму. В этих условиях электролитный состав поверхностной пленки влаги существенно влияет на ее коррозионную активность.

Следует отметить, что в пленке влаги являющейся электролитом могут протекать разнообразные процессы, вызванные электролизом между металлом коллектора и разноименно полюсными графитовыми щетками [5]. Электрохимическое разложение воды между щетками и коллекторным металлом или кольцом приводит к ситуации, когда катионы водорода и анионы гидроксидов мигрируют соответственно к катоду и аноду. Эти процессы оказывают различное влияние на износ контактных пар в зависимости от конструкции УСТ. Так, в случае УСТ металлического коллектора катодные и анодные щетки формируют одну поверхность скольжения.

В тоже время различный механизм влияния полярности щеток на структуру контактной поверхности скольжения отчетливо проявляется на кольцах турбогенераторов, каждое кольцо которых имеет свою полярную щетку. В зоне контакта под анодно-поляризованной электрощеткой на ее поверхности ионы гидроксидов ионизируются до молекулярного кислорода и воды, согласно реакции:



В тоже время на дорожке металла кольца являющейся катодной зоной, протекает процесс восстановления водорода по реакции:



Соответственно под катодно-поляризованной щеткой эти процессы меняются местами, причем процесс разложения воды возникает при определенном напряжении разложения, теоретическое значение которого составляет 1,23 В [6].

В последнем случае анодно-поляризованное положительно заряженное кольцо активно электрокорродирует, при этом поступающие в водную пленку ионы металла могут восстанавливаться на катодно-поляризованной щетке, в виде металла. Данный металл в силу слабой адгезии к материалу катодной щетки открашивается в зону контакта и выступают в роли сильного абразива. Это находит подтверждение в [7]. Положительное кольцо УСТ изнашивается больше отрицательного, причем его рабочая поверхность становится матовой, шероховатой. Катодные щетки, установленные на положительном кольце, также изнашиваются сильнее. Повышенный износ положительного кольца УСТ увеличивает нестабильность переходных процессов при этом искрение на шероховатой металлической поверхности увеличивается и возникают предпосылки для дугообразования и как следствие приводит к образованию не токопроводящих пятен (пригаров) создающих существенные сложности в процессе эксплуатации электрических машин. Традиционным методом ликвидации не токопроводящих пятен является механическая проточка коллектора с последующей достаточно длительным притиранием поверхности сопряжения контактирующих притивотел. Для выравнивания этого износа рекомендуется периодически, 1-2 раза в год, менять направление проходящего через контакт тока. При наличии дуговых процессов поверхность кольца может оплавляться и подвергаться сильной эрозии, что является сравнительно распространенным негативным явлением [8].

Процесс электролиза воды реализуется в условиях дополнительных затрат электроэнергии на преодоление электрического сопротивления водно-пленочного электролита, электродов, контактов, перенапряжения процессов выделения газов, дополнительного сопротивления, обусловленного концентрационной и диффузионной поляризацией, поэтому реально для прохождения этих процессов необходимо создание напряжения до 2 В [6]. Таким образом, описанные явления, происходящие в рабочей зоне контактирующих элементов щетка – коллектор сводятся к наблюдаемым визуально эффектам, когда участок поверхности кольца, находящийся под электрощеткой катода темнеет из-за более интенсивного окисления за счет дополнительного молекулярного кислорода при разложении воды, а участок дорожки кольца, попавший под электрощетку – анод – более светлый.

Протекание процессов химической и электрохимической коррозии в УСТ приводит к образованию на поверхности коллектора или кольца пассивной окисно-закисной пленки, являющейся составной частью политурной пленки. Политурная пленка покрывает поверхность металла коллектора и состоит из окисно-закисной меди (65,8 %), углеродистого материала электро-щеткой (22,1 %) и прочих компонентов (12,1 %). К прочим элементам относятся примеси: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO. Примеси вносятся в политуру из материала электро – угольных изделий [5].

Техническими условиями величина переходного сопротивления «политурной пленки» не нормируется, а ее толщина находится в пределах (5÷100) нм. Окисно-закисная составляющая политурной пленки образуется в условиях повышенных температур, вызванных разогревом трущихся поверхностей [9].

В условиях газовой коррозии (парогазовой) медь окисляется до оксида меди(I) (Cu_2O) при недостатке кислорода и до $200\text{ }^\circ\text{C}$, а до оксида меди(II) (CuO), при избытке кислорода (вращение) и температурах порядка $400\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$ [10]. Оксид меди черного цвета, а закись красно-коричневого, поэтому с учетом черной углеродистой пленки политура может иметь оттенки от светло красного до черного.

С учетом объемных температур коллектора и щеток в среднем достигающих $150\text{-}300\text{ }^\circ\text{C}$ [9], основным оксидом политурной пленки является закись меди Cu_2O . Тем не менее, при высоких контактных температурах, вызванных не оптимальными процессами коммутации возможно формирование на поверхности значительных количеств CuO (пригары).

Политузная пленка имеющая в своем составе закись меди выступает в этом смысле как твердая смазка, предохраняющая коллектор и щетки от преждевременного истирания, поскольку имеет низкий коэффициент трения [11]. Если щетка скользит по коллектору при отсутствии тока, то политура достаточной толщины может не образовываться, поэтому при транспортировке локомотива в “холодном” состоянии на длительное расстояние обычно снимают щетки с тяговых двигателей. Последнее, очевидно, связано с механическим истиранием плоскости скольжения и высоким коэффициенте трения чистого металла в сравнении с закисной пленкой.

Таким образом, в отсутствии тока при вращении коллекторов и колец на холостом ходу скорость образования политурной пленки и в первую очередь пассивной оксидно-закисной пленки низкая, что показывает исключительную важность электрической поляризации (электрокоррозии, коррозии электрическим током) на скорость и глубину образования защитной поверхностной политуры.

В присутствии тока политузная пленка находится в динамическом равновесии, при котором одновременно происходит процесс образования пленки, вследствие окисления металла поверхности и частичное ее истирание из-за трения друг о друга контактных противотел [12].

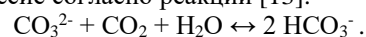
Однако в ряде случаев (работа электрической машины в высотных условиях, а также при переходных процессах, сопровождающихся интенсивным искрением) этот процесс смещается в сторону уменьшения толщины политурной пленки, что вызывает возрастание износа щеток, коллекторов и контактных колец. Слишком малая толщина политурной пленки или ее отсутствие существенно повышает коэффициент трения в зоне контакта и тем самым создает условия для повышенного абразивного износа контактных поверхностей [12]. Последнее приводит к быстрому истиранию контактной части щетки и существенным проблемам в работе электрических машин, особенно в тех случаях, где частая замена щеток невозможна по условиям эксплуатации. Кроме того, абразивный износ поверхности коллектора и связанные с этим неблагоприятные условия искрообразования приводят к необходимости проточки его поверхности, что сильно усложняет эксплуатацию.

Специфика работы УСТ состоит в циклических колебаниях уровня влажности на границе раздела и воздушном пространстве, определяемая диссипацией тепла контактирующих противотел вследствие трения и переходных процессов. В нормальных условиях эксплуатации

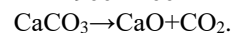
электрической машины разогрев воздушного пространства УСТ и поверхностей рабочих противотел в определенный момент времени становится выше температуры кипения влаги. Повышение температуры приводит к испарению влаги и замене протекания электрохимических коррозионных процессов на химические.

Химические процессы имеют свою кинетику, причем рост оксидной пленки интерпретируется законом сплошности Пиллинга и Бедворса [4]. Тем не менее даже в этих условиях при наличии критической влажности воздуха происходит проникновение ее в УСТ вследствие подпитки его новыми порциями влаги воздуха при вращении коллектора или кольца. При этом водные пары будут играть несомненную роль в кинетике протекания низкотемпературной газовой коррозии.

Следует отметить, что помимо электролиза в водной пленке воды на поверхности контакта реализуется карбонатное равновесие согласно реакции [13]:



Вода, в которой соблюдается основное карбонатное равновесие, является стабильной. Гидрокарбонат - ионы существуют в пленочном растворе только при наличии свободной угольной кислоты. Воды, содержащие избыток свободной угольной кислоты над равновесной, являются агрессивными и обладают высокой растворяющей способностью. Поэтому повышение относительного содержания в воздухе закрытого помещения углекислого газа в условиях сжигания различных топлив особенно при повышенной цеховой влажности может увеличивать растворяющую способность воды по отношению к металлу и оксидно-закисной пленке на поверхности металла коллектора или кольца из стали и бронзы. Реакция углекислотного равновесия смещается в сторону образования гидрокарбонат - ионов, а сама вода в присутствии повышенного содержания углекислого газа имеет слабокислую реакцию ($\text{pH} = 5.5\text{-}6.5$) и легко может разъедать как оксидные пленки, так и сам металл. Особенно этот процесс интенсифицируется в условиях мягкой воды с пониженным содержанием до 2 мг-экв/л солей, поскольку растворимость углекислого газа в ней резко возрастает. Однако в рабочих режимах работы электрической машины гидрокарбонаты при нагревании водных пленок от трения и переходных процессов достаточно быстро превращаются в карбонаты. В дальнейшем возможно окисление карбонатов до оксидов, но процесс может происходить лишь при высокой температуре, например, для ионов кальция по реакции, протекает в диапазоне $T = 900\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$:



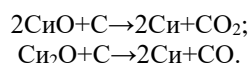
Данная реакция может реализовываться в условиях повышенного бального искрения. Угольная кислота даже при незначительном нагревании разлагается на углекислый газ и воду и происходит процесс активной дегазации из испаряющейся влаги углекислого газа.

Таким образом, в условиях высокой жесткости воды, определяемой содержанием в ней гидрокарбонатов кальция и магния, термические процессы, происходящие от трения и переходных процессов, в той или иной степени приводят к образованию карбоната кальция и других труднорастворимых солей [14], многие из которых в том числе оксид кальция, карбонат кальция обладают слабо-абразивным шлифующим эффектом. Мягкая вода в условиях насыще-

ния ее углекислым газом является еще более агрессивной по отношению к оксидно-закисной составляющей политурной пленки и металлу коллектора вследствие образования большого количества угольной кислоты.

В отдельных случаях медь коллекторных бронз может в условиях длительного контакта с влажным воздухом образовывать зеленные нерастворимые пленки малахита - $\text{SiCO}_3 \times \text{Si}(\text{OH})_2$. Данное явление характерно для электрических машин особенно длительно простаивающих в условиях естественной атмосферы, не содержащей сульфатов (сульфат-ионов) и хлоридов (хлорид-ионов), под навесом или не отапливаемом складе [15]. Удаляются данные пленки шлифованием (проточка) коллекторов.

Следует отметить, что высокие температуры в УСТ могут приводить к неблагоприятному явлению – восстановлению оксидов металла частицами углерода согласно реакциям:



Пленка частиц углерода, образованная механическим износом щеток при трении сравнительно равномерно распределена на поверхности коллектора или контактного кольца, и имеет среднюю толщину от 100-1000 нм [16]. Согласно авторам [17] существует стадийность в реакции восстановления оксидно-закисной пленки согласно схеме: $\text{SiO} \rightarrow \text{Si}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}$. Для первой стадии диапазон температур протекания реакции от 430 до 650 °С, а для второй стадии от 650 до 850 °С. Также возможность протекания данных реакций зависит от количественного соотношения оксидов и углерода. Так соотношение оксидов и углерода, характеризующее избытком углерода по стехиометрическому соотношению, может снижать температуру процессов восстановления первой стадии до 430, а второй до 650 °С. Данные процессы, очевидно, могут протекать в ненадлежащих режимах работы электрических машин, в случае не оптимально применяемых электрощеток, давлений на них, при высоких индексах искрения.

Высокотемпературные процессы, протекающие в УСТ в условиях разноименно заряженных щеток, могут приводить к существованию условий для термоэлектронной эмиссии. Под действием поля возникает эмиссия положительно заряженных ионов и микрочастиц анода (кольцо или коллектор) в сторону катода после того как они отделяются от атомной решетки анода в результате электролиза [5].

При высокой концентрации приложенного напряжения в зазоре УСТ на остром скеле кромки щетки или острой кромке щетки происходит ионизация атомов воздуха эмиссионными электронами и возникает самостоятельный разряд, называемый “темновым”. Дальнейшем может возникнуть тлеющий разряд, приводящий к образованию “катодного пятна” и разряд превращается в искровой. Электрическая прочность воздушного промежутка нарушается, происходит пробой и резкое увеличение тока между контактирующими деталями. В какие-то моменты щетка перестает касаться кольца из-за вибрации и между ними образуется воздушный просвет, приводящий к разрыву токовой цепи и возникновению дуги [19]. Наиболее сильная дуга образуется в местах концентраторов электрического поля – на вершинах микровыступов дорожек и на острых кромках дорожек вдоль компрессионных каналов [15].

Также в УСТ возможно протекание процессов классифицирующиеся общим названием “плазменный электролиз” [18].

Переходные электродуговые процессы, сопровождающиеся образованием низкотемпературной плазмы и начинают протекать при температурах уже при 1900 °С. Их воздействие может приводить к образованию капельной, паровой и ионизированной металлических фаз, способствуют интенсивной эрозии металла коллектора, при этом поверхность кольца и коллектора быстро выходит за пределы ремонтных параметров.

Следует отметить, что процессы сильной эрозии стальных и бронзовых коллекторов и колец электрических машин является достаточно распространенным явлением, что требует не только внимательного изучения физико-химических особенностей данных негативных процессов, но и разработки комплексных мероприятий для предотвращения их возникновения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа двигателей электрических машин постоянного тока, предназначенных для эксплуатации в высотных условиях, связано с уменьшением содержания влаги и кислорода в окружающей среде. Двигатели имеют герметизированное исполнение. Для выравнивания атмосферного давления и давления внутри двигателя у большинства герметизированных двигателей имеется дренажное отверстие, закрытое сеткой. У некоторых двигателей без дренажа наблюдается повышенный износ щеток, который приводит к снижению сопротивления изоляции и необходимости ремонта двигателя.

Для противодействия негативным климатическим проявлениям, для уменьшения износов контактных элементов УСТ авторами предложено использовать композиционный элемент, состоящий из дисульфида молибдена (ДМ) связующим. Данная смазывающая щетка (СЩ) устанавливается в отдельный щёткодержатель или в карман конструктивно соединённый с токоведущим щёткодержателем на рабочую дорожку коллектора. В опытах использовались двигатели 5 Вт как с дренажом, так и без дренажа.

Для оценки влияния содержания кислорода и влаги в окружающей среде на сопротивление политурной пленки (ПП) и износ щёток в герметизированных двигателях препарировалось шесть герметизированных двигателей мощностью 5 Вт. Вырезались два окна для визуальной оценки искрения при работе в нормальных условиях. Окна при необходимости закрывались герметичными заглушками. Между токоведущими щётками ставили штатный щёткодержатель, в который при необходимости размещали датчики для замера сопротивления ПП. Двигатели испытывались совместно с редуктором при работе под нагрузкой. Перед измерениями исследуемые щётки притирались до получения 100% контактной поверхности. Щётки взвешивались на аналитических весах и двигатели работали 150 циклов в нормальных климатических условиях, после чего определялся износ щёток и сопротивление ПП с помощью датчика, установленного в дополнительный щёткодержатель [22]. Затем одна пара двигателей отработывала – 100 циклов в термобарокамере с температурой $t = +120$ °С, давлением $P = 15$ мм. рт. ст. В конце режима измерялся износ щёток (износ щёток рассчитывался через

их удельный вес) и сопротивление ПП (принято допущение, что сопротивление ПП характеризует её толщину). По аналогичной методике испытывались оставшиеся двигатели. Вторая пара отработала в термобарокамере 200 циклов, а третья – 300.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1, представлены усреднённые результаты сопротивления ПП и износа токоведущих щёток по двум двигателям после испытательных режимов.

Таблица 1

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

Нормальные условия, число рабочих циклов: 150		Режим работы термобарокамеры: t = +120 ± 3°C, P = 15 ± 1% мм. рт. ст.					
		число рабочих циклов: 100		число рабочих циклов: 200		число рабочих циклов: 300	
Сопротивление полиуретной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 ⁻³	Сопротивление полиуретной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 ⁻³	Сопротивление полиуретной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 ⁻³	Сопротивление полиуретной плёнки, Ом	Износ щёток, мм·10 ⁻³
0,821	7,52	1,12	39,27	-	-	-	-
0,812	8,36	-	-	1,45	68,78	-	-
0,759	8,36	-	-	-	-	1,79	111

Как следует из табл. 1 (разгерметизация за счёт снятия заглушки на смотровых окнах двигателя), по мере наработки в термобарокамере с давлением 15 мм. рт. ст. наблюдается увеличение сопротивления ПП по отношению к нормальным условиям. Повышенный износ щёток по отношению к нормальным условиям в этом случае можно очевидно объяснить эффектом сухого трения, которое возникает из-за уменьшения содержания паров воды в окружающей атмосфере.

Результаты аналогичных испытаний четырёх герметизированных двигателей мощностью 5 Вт (был только установлен дополнительный щёткодержатель) приведены в табл. 2, и показывают снижение сопротивления ПП и повышение износов щёток в 2,7 раза относительно предыдущих результатов. Очевидно, повышенная герметизация двигателя приводит к снижению содержания кислорода внутри двигателя за счёт его выгорания под действием коммутационного искрения, что приводит, по всей видимости, к смещению процесса истирания и образования ПП в сторону уменьшения динамики её образования, вызывая более интенсивный износ щёток.

Степень искрения в опытах оставалась приблизительно постоянной (не более 1 ½ балла) и замерялась прибором контроля коммутации электрических машин ПМК-5 [23]. Прибор ПМК-5 предназначен для оценки степени искрения щёток коллекторных электрических машин в стационарных режимах по сигналу с разно-полярных щёток индикатором.

Таблица 2

Сопротивление ПП и износ токоведущих щёток герметизированных двигателей мощностью 5 Вт

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

Для проверки влияния материала коллектора на износ токоведущих щёток, были проведены исследования трёх герметизированных двигателей постоянного тока мощностью 2,5 Вт у которых на корпусе имелся дренаж с коллекторами из меди, кадмиевой и хромовой бронзы и токоведущими щётками Г-21А (табл. 3). Исследовательский цикл включал их работу в нормальных условиях и в высотных (давление 15 мм. рт. ст.) в сочетании с температурами +85 °C и -60 °C, с замером суммарного износа щёток (число циклов по каждому режиму одинаково).

Таблица 3

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

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

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

Износ щёток электрических машин, предназначенных для работы в высотных условиях, может быть уменьшен за счёт снижения коэффициента трения щётка-коллектор путём установки СЩ, выполненных на основе ДМ [20].

В табл. 4 представлены результаты эффективности использования СЩ в герметизированном электродвигателе мощностью 5 Вт у которого в дополнительный щёткодержатель была поставлена СЩ. Применение СЩ снижает износ токоведущих щёток при работе в термобарокамере с

температурами +120 °С и -60 °С, при давлении 15 мм. рт. ст. соответственно в 5 и 7 раз. При работе в нормальных условиях износ снижается в 1,5 раза. В табл. 5 представлены результаты по оценке влияния СЩ на характеристики испытуемого двигателя, работающего в составе механизмов с щётками МГС-7 и Г-21А в нормальных условиях и термокамере.

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

Таблица 4

Износ токоведущих щёток электродвигателя мощностью 5 Вт при установке смазывающей щётки

Условия опытов	Марка щёток	Режим работы термокамеры		
		нормальные условия	t = 120±3°C, P = 15 мм. рт. ст.	t = -60±3°C, P = 15 мм. рт. ст.
			износ щёток за испытательный цикл, мм·10 ⁻³	
Смазывающей щётки нет	Г-21А	9,74	12,18	80,4
Установлена смазывающая щётка	Г-21А	6,09	2,43	10,95

Таблица 5

Сравнительные характеристики герметизированного двигателя мощностью 5 Вт при установке смазывающей щётки

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

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

В табл. 6, представлены результаты уменьшения износов токоведущих щёток при установке СЩ на разные типы коллекторов двигателя мощностью 2,5 Вт. Установка СЩ коллектор из меди, кадмиевой и хромовой бронзы соответственно снижает износы штатных щёток в 2,9; 4,2 и 6,9 раз относительно штатного коллектора, изготовленного из меди. Давление на СЩ при этом было одинаковым.

Таблица 6

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

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

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при работе в высотных условиях износы щёток в случае герметизированного двигателя увеличиваются не только за счёт снижения содержания влаги в окружающей среде, но и снижения кислорода в воздухе, что приводит к уменьшению толщины ПП и повышенному износу щёток. Применение смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена, может значительно уменьшить износы щёток без значительных конструктивных доработок.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Вопрос повышения системной надёжности УСТ электрических машин на основе противодействия негативным физико-химическим процессам, возникающим в процессе эксплуатации электродвигателей, требует поиска новых технологических путей и подходов, одним из которых является формирование поверхности сопряжения щётка-коллектор с эффективными трибологическими характеристиками [8, 20, 21].

ЛИТЕРАТУРА

- Сафонов А.Л. Прямоугольные электрические соединители. Фреттинг - коррозия в электрических контактах. / А.Л. Сафонов, Л.И. Сафонов // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – №3. – С. 48-54.
- Янин Е.П. Коррозия металлов и металлических конструкций как источник загрязнения окружающей среды // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2007. – №6. – С. 46-92.

3. Королянчук Д.Г. О причинах увеличения скорости коррозии под тонкими пленками воды. / Д.Г. Королянчук, В.Г. Нефедов, В.И. Овчаренко // Украинский государственный химико-технологический университет. Металознавство та термічна обробка металів. – 2017. – №4. – С. 31-37.

4. Стекольников Ю.А. Физико-химические процессы в технологии машиностроения. Учеб. пособие / Ю.А. Стекольников, Н.М. Стекольников. – Елец: Издательство Елецкого государственного университета имени И.А. Бунина. – 2008. – 136 с.

5. Качин О.С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2008. – 178 с.

6. Хохлаева Е.А. Водоподготовка: Справочник / Е.А. Хохлаева, Я.Е. Резник; Под ред. С.Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.

7. Качин С.И. Результаты исследования влияния механического состояния коллекторов и подшипников на процессы износа в скользящем контакте электрической машины / С.И. Качин, О.С. Качин // Известия высших учебных заведений. Электротехника. – 2011. – №6. – С. 5-9.

8. Ростик Г.В. технического состояния турбогенераторов: учеб. пособие. – Москва: ИПК госслужбы, 2008. – 489 с.

9. Фоминых А.А. Оценка влияния твердой смазки на трибохарактеристики узлов скользящего токосъема: дис. ... канд. техн. наук. – Киров, 2015. – 233 с.

10. Коршунов А.В. Особенности окисления нанопорошков меди при нагревании в воздухе / А.В. Коршунов, А.П. Ильин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, №3. – С. 5-13

11. К вопросу о твердофазном окислении металлических поверхностей коллекторов электромашин / А.И. Изотов, А.А. Фоминых, Д.К. Покашев и др. // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017): сб. трудов по материалам науч.- практич. конфер. – 2017. – С. 1093-1102.

12. Мышкин Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М.К. Браунович. – Идательский дом «Интеллект», 2008. – 560 с.

13. Концевой С.А. Гидрокарбонатное равновесие в водных растворах // Наука, техника и образование. – 2015. – №9. – С. 7-9.

14. Васильева Л.В. Формирование элементного и фазового состава отложений в теплоэнергетическом оборудовании в условиях различных схем водоподготовки и способы их удаления: дис. ... канд. хим. наук. – Краснодар, 2017. – 136 с.

15. Самородов Ю.Н. Риски повреждения турбогенераторов. Библиотечка электротехника. Выпуск 3. Часть 1. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2011. – 80 с.

16. Цопов Г.И., Овсянников В.Н., Елшанский Н.А. Механизм контактирования скользящего контакта из углеграфитовых материалов / Г.И. Цопов, В.Н. Овсянников, Н.А. Елшанский // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – №1(43). – С. 111-114.

17. Григорян Е.Г. Кинетика и механизм восстановления оксида меди (II) различными восстановителями в неизотермических условиях. / Е.Г. Григорян, О.М. Ниязян, С.Л. Харатян // Химический журнал Армении. – 2006. – №4. – С. 44-54.

18. Погребняк А.Д. Электролитно-плазменная технология для нанесения покрытий и обработки металлов и сплавов. / А.Д. Погребняк, А.Ш. Каверина, М.К. Кылышканов // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2014. – Т.50, №1. С. 72-88.

19. Самородов Ю.Н. Риски повреждения турбогенераторов из-за дефектов. Библиотечка электротехника. Выпуск 4. Часть 2. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011. – 64 с.

20. Способ снижения износа узлов трения в электрических машинах за счет использования нанотехнологий / А.И. Изотов, С.А. Изотов, А.А. Фоминых и др. // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения)»: сб. трудов сб. трудов по материалам науч.-технич. конфер. (Иваново 31 мая-02 июня 2017). – Иваново: из-во Ивановский государственный энергетический университет им. Ленина, 2017. – С. 144-147.

21. Increasing operational life of brush-contact device in the turbine generator due to using lubricating molybdenum disulphide brushes / A.I. Izotov, A.A. Fominykh, S.V. Nikulin et al. // IOP Conf. Series: Journal of Physics. – 2018. – no. 944. – 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012045

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

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

Influence of Physicochemical Processes on Reliability of Node of Sliding Current Collector of Electric Machines

Izotov S.A., Izotov A.I., Fominyh A.A.

Vyatka State University
Vyatka, Russian Federation
usr00151@vyatsu.ru

Abstract. Electric DC machines having wide application in the nodes and mechanisms of modern equipment and devices operate in different climatic conditions. These conditions often determine the characteristics of the operation of electric machines, repair - preventive measures. In many respects, the reliability of DC electric machines is determined by a sliding current collection unit (MOU), in which the current-carrying brushes are in dynamic and static contact with the plates of a metal collector or ring. The physicochemical and chemical processes occurring at the interface of the contacting counter-bodies determine the switching processes and reliability (TS). The purpose of the article is to analyze and study the influence of probable physicochemical factors on the operational reliability of the electrical current collection sliding assembly unit. The results of scientific and practical work allow to determine activities aimed at eliminating the negative impact of adverse physical and chemical environmental factors on electrical machines.

Keywords: electric machine, brush, molybdenum disulfide, solid lubrication, slip current collection unit, collector wear.

REFERENCES

1. Safonov A.L., Safonov L.I. Rectangular electrical connectors. Fretting is corrosion in electrical contacts [Pryamougol'nye elektricheskie soediniteli. Fretting - korroziya v elektricheskikh kontaktakh], *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti [Technologies in the electronic industry]*, 2009, no.3, pp. 48-54. (in Russ.)
2. Yanin E.P. Corrosion of metals and metal structures as a source of environmental pollution [Korroziya metallov i metallicheskih konstruksiy kak istochnik zagryazneniya okruzhayushchey sredy], *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov [Problems of the environment and natural resources]*, 2007, no.6, pp. 46-92. (in Russ.)
3. Korolyanchuk D.G., Nefedov V.G., Ovcharenko V.I. About the reasons for the increase in corrosion rate under thin films of water [O prichinakh uvelicheniya skorosti korrozii pod tonkimi plenkami vody], *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv [Metal metallurgy and thermal processing of metals]*, 2017, no.4, pp. 31-37. (in Russ.)
4. Stekolnikov Yu.A., Stekolnikova N.M. *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnologii mashinostroeniya. Ucheb. posobie* [Physico-chemical processes in engineering technology: textbook], Yelets, Publishing House of Yelets State University named after I.A. Bunin, 2008, 136 p. (in Russ.)
5. Kachin O.S. *Povyshenie resursa skol'zyashchego kontakta universal'nykh kollektornykh elektrodvigateley* [Increasing the resource of the sliding contact of universal collector motors], Dissertation, Tomsk, 2008. (in Russ.)
6. Khokhryakova E.A., Reznik Y.E. *Vodopodgotovka: Spravochnik* [Water preparation: Handbook], Moscow, Aqua-Term, 2007, 240 p. (in Russ.)
7. Kachin S.I., Kachin O.S. Results of the study of the influence of the mechanical state of collectors and bearings on the processes of wear in the sliding contact of an electric machine [Rezultaty issledovaniya vliyaniya mekhanicheskogo sostoyaniya kollektorov i podshipnikov na protsessy iznosa v skol'zyashchem kontakte elektricheskoy mashiny], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektrotehnika [Proc. of higher educational institutions. Electrical engineering]*, 2011, no. 6, pp. 5-9. (in Russ.)
8. Rostik G.V. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya turbogeneratorov: ucheb. posobie* [Evaluation of the technical condition of turbine generators: textbook], Moscow, IPK of the civil service, 2008, 489 p. (in Russ.)
9. Fominyh A.A. *Otsenka vliyaniya tverdoy smazki na tribokharakteristiki uzlov skol'zyashchego tokos"ema* [Evaluation of the influence of solid lubricant on tribo characteristics of sliding current collection sites], Dissertation, Kirov, 2015, 233 p. (in Russ.)
10. Korshunov A.V., Il'in A. Peculiarities of the oxidation of copper nanopowders when heated in air [Osobennosti okisleniya nanoporoshkov medi pri nagrevanii v vozdukh], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta]*, Tomsk, 2008, no. 313(3), pp. 5-13. (in Russ.)
11. Izotov A.I., Fominykh A.A., Pokashev D.K., Kokhanchuk N.D., Izotov S.A. On the issue of solid-phase oxidation of metal surfaces of collector-electric machines [K voprosu o tverdogaznom okislenii metallicheskih poverkhnostey kollektorovelektromashin], *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK-2017): sb. trudov po materialam nauch.- praktich. konfer [All-Russian annual scientific and practical conf. "Society. Science. Innovations (NPK-2017)"]*, 2017, pp. 1093-1102. (in Russ.)
12. Myshkin N.K., Konchiz V.V., Brownovich M.K. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts], Intellect, 2008, 560 p. (in Russ.)

13. Kontseva S.A. Hydrocarbonate equilibrium in aqueous solutions [Gidrokarbonatnoe ravnovesie v vodnykh rastvorakh], *Nauka ,tehnika i obrazovanie [Science, technology and education]*, 2015, no.9, pp. 7-9. (in Russ.)

14. Vasileva L.V. *Formirovaniye elementnogo i fazovogo sostava otlozheniy v teploenergeticheskom oborudovanii v usloviyakh razlichnykh skhem vodopodgotovki i sposoby ikh udaleniya* [Formation of the elemental and phase composition of deposits in heat power equipment in the conditions of various water treatment schemes and methods of their removal], Dissertation, Krasnodar, 2017. (in Russ.)

15. Samorodov Yu.N. *Riski povrezhdeniya turbogeneratov. Bibliotekha elektrotehnika* [Risks of damage to turbine generators. Library of electrical engineering], Moscow, NTF Energoprogress, Energetik, 2011, Is. 3, Part 1, 80 p. (in Russ.)

16. Tsopov G.I., Ovsyannikov V.N., Elshansky N.A. Mechanism of Contacting Sliding Contact from Carbon-Graphite Materials [Mekhanizm kontaktirovaniya skol'zyashchego kontakta iz uglegrafitovykh materialov], *Vestnik transporta povolzh'ya [Volga Region Bulletin]*, 2014, no.1(43), pp. 111-114. (in Russ.)

17. Grigoryan E.G., Niazyan O.M., Kharatyan S.L. Kinetics and mechanism of reduction of copper (II) oxide by various reducing agents in non-isothermal conditions [Kinetika i mekhanizm vosstanovleniya oksida medi(II) razlichnymi vosstanovitel'yami v neizotermicheskikh usloviyakh], *Khimicheskii zhurnal Armenii [Chemical Journal of Armenia]*, 2006, no.4, pp. 44-54. (in Russ.)

18. Pogrebnyak A.D., Kaverina A.Sh., Kylyshkanov M.K. Electrolytic-plasma technology for coating and processing of metals and alloys [Elektrolitno-plazmennaya tekhnologiya dlya naneseniya pokrytiy i obrabotki metallov i splavov], *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov [Physicochemistry of the surface and protection of materials]*, 2014, no. 50(1), pp. 72-88. (in Russ.)

19. Samorodov Yu.N. *Riski povrezhdeniya turbogeneratov iz-za defektov Bibliotekha elektrotehnika* [Risks of damage to turbine generators due to defects. The library of electrical engineering], Moscow, NTF Energoprogress, 2011, Is. 4, Part 2, 64 p. (in Russ.)

20. Izotov A.I., Izotov S.A., Fominykh A.A., Timoshchenko V.N., Sobolev D.V. A method of reducing the wear of friction units in electric machines through the use of nanotechnology [Sposob snizheniya iznosa uzlov treniya v elektricheskikh mashinakh za schet ispol'zovaniya nanotekhnologiy], *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (KhIKh Benardosovskie chteniya)" [International Scientific and Technical Conference "The State and Prospects for the Development of Electrical and Thermal Technologies (XIX) Benardosov Readings"]*, Ivanovo, 2017, pp. 144-147. (in Russ.)

21. Izotov A.I., Fominykh A.A., Nikulin S.V., Prokoshev D.K., Legoti A.B., Timina N.V. Increasing operational life of brush-contact device in the turbine generator due to using lubricating molybdenum disulphide brushes. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, no.944, 012045. DOI:10.1088/1742-6596/944/1/012045

22. Izotov A.I., Fominykh A.A., Timoshchenko V.N., Izotov S.A., Timina N.V. Improving the reliability of the brush-contact device of electric motors [Povysheniye nadezhnosti shchetotchno-kontaktного ustroystva elektricheskikh dvigateley], *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva [Mechanization and electrification of agriculture]*, 2013, no. 4, pp. 32-33. (in Russ.)

23. Kharlamov V.V., Sergeev R.V., Shkodun P.K., Akhmedzyanov G.G. *Ustroystvo dlya izmereniya intensivnosti iskreniya na kollektore elektricheskoy mashiny* [Device for measuring the intensity of arcing on the collector of an electrical machine], Patent for useful model 53820, IPC H01R 39/58, 2005. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Изотов С.А. К вопросу о влиянии физико-химических процессов на надежность узла скользящего токосъема электрических машин / С.А. Изотов, А.И. Изотов, А.А. Фоминых // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2019. – Т.6, №1. – С. 30-39. DOI: 10.24892/RIJEE/20190105

Reference to article

Izotov S.A., Izotov A.I., Fominykh A.A. Influence of physicochemical processes on reliability of node of sliding current collector of electric machines, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2019, vol.6, no.1, pp. 30-39. DOI: 10.24892/RIJEE/20190105