УДК 534.1:621.313

МОДЕЛЬ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЁМА

В.С. Деева, С.М. Слободян
(*ЭНИН НИТПУ*)
М.С. Слободян
(*Институт физики высоких технологий НИТПУ*)

Рассмотрена проблема оценки живучести скользящего периодического контакта – щёток коллекторных электрических машин. Предложена марковская модель износа щёток при скольжении по ламельной структуре коллектора электрических машин, учитывающая особенности функционирования щёточного узла.

***Ключевые слова**: диагностика, электрический скользящий контакт, случайная модель.*

Введение

Проблема повышения ресурсных характеристик и коммутационной надёжности – основных эксплуатационных характеристик, прерываемых во времени, коммутируемых устройств скользящего токосъёма, в том числе электромагнитных устройств метания тел, коллекторных электрических машин и др., в сильной степени определяемых состоянием поверхностей тел взаимодействия контактного узла токосъёма, актуальна до сих пор [1 – 6].

Анализ коммутации скользящим контактным узлом

Процесс коммутации контактным узлом токосъёма цепи передачи тока зачастую обусловлен [1, 2] принципом работы устройств, которым присущ скользящий токосъём, например, турбогенераторам, коллекторным машинам и т. п. Как в любой динамической системе с временной многофакторной вариацией поля параметров изменение одного или симбиоза нескольких наиболее чувствительных параметров может заметно влиять на стабильность процесса коммутации передачи тока и, при определённых условиях, приводить к росту коммутационной напряжённости и развитию детерминированной хаотической неустойчивости процесса передачи тока электрическим контактом, скользящим по поверхности второго тела контактной пары, например, в коллекторном токосъёме – щёточным контактом.

Скользящий элемент – щёточный контакт – это важный элемент существенного влияния на изменение тока не только в коммутируемой секции, но и в контуре коммутации скользящего токосъёма. Так, например, высокая коммутационная устойчивость – один из факторов, определяющих постоянное внимание к проблеме повышения надёжности и ресурса электрических машин. Особенно важным для достижения высокой коммутационной устойчивости является обеспечение непрерывности щёточного контакта при передаче тока узлом скользящего токосъёма в условиях динамической неустойчивости профиля контактной поверхности коллектора и нестабильности параметров ряда других узлов. Устойчивость процесса коммутации – фактор «безискровой» работы электрических машин.

Для простейшего анализа явлений динамика процесса коммутации в этого типа машинах в достаточно общем случае может быть представлена системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка [1]:

$$L\frac{di}{dt}+\sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt} = \delta u_{\text{щ}}(J) - i(t)R_s - e_k(t),$$

где $L\dfrac{di}{dt} = -e_L$ и $\sum\limits_{k=1} M_k \dfrac{di_k}{dt} = -e_k$ – э.д.с. самоиндукции; $\delta u_{\text{щ}}(J) = [\Delta u_{\text{н}}(J) - \Delta u_{\text{с}}(J)]$ – разность значений переходных падений напряжений на пространственном интервале размера щётки (между передним набегающем $\Delta u_{\text{н}}(J)$ и задним сбегающем $\Delta u_{\text{с}}(J)$ с ламели краями щётки; $i(t)$ – коммутируемый ток; R_s – сопротивление коммутируемой секции; $e_k(t)$ – коммутирующая э.д.с., наводимая в секции (при её взаимодействии с магнитным полем) в зоне коммутации. Эта система уравнений используется практически всеми исследователями как основа изучения процесса коммутации.

Идеальной коммутации соответствует наилучшая коммутационная устойчивость машин, когда $di/dt \equiv 0$ и для предельно малого размера щётки (игольчатый электрод), когда $\Delta u_{\text{н}}(J) \equiv \Delta u_{\text{с}}(J)$. Тогда система нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка процесса коммутации вырождается в систему уравнений закона Ома: $i(t)R_s = e_k(t)$.

Если первое условие – достижение высокой коммутационной устойчивости считать целью, то второе – минимизация $\delta u_{\text{щ}}(J)$ (разность переходных падений напряжений на щётке), а в идеале – обеспечение соотношения $\Delta u_{\text{н}}(J) = \Delta u_{\text{с}}(J)$ является фактором достижения этой цели.

В [1, 2, 4] показано, что наиболее сложным для учёта в уравнениях контура коммутации электрических машин является характер распределения электрической проводимости в контактном слое. В зависимости от структуры поверхностей скользящих относительно друг друга тел в контактном пространстве щёточного узла токосъёма могут возникать следующие виды контактного взаимодействия: прямой контакт неравномерностей поверхностей соприкасающихся тел; контакт поверхностей через слой смеси фракций деструкции (разрушения) элементов поверхностей этих же тел; симбиоз обоих приведённых случаев – частично прямой непосредственный точечный контакт выступами поверхностей тел, частично через слой фракций деструкции поверхности тел. Всем типам контакта присуще наличие областей его полного отсутствия. В связи с этим контактное пространство щётки, скользящей по составному разрывному (ламельному) и сплошному кольцу коллектора, с точки зрения динамического взаимодействия является вероятностной системой. Её характеристики определены физико-механическими свойствами поверхностных слоёв периодических, слоистых или сплошных структур и динамикой контакта тел.

Ввиду неравномерности и дискретности структуры контактного поля деструкция поверхностных слоёв идёт не в сплошном двумерном поле, а только в отдельных частях контактного соприкосновения: в областях прямого контакта поверхностей сопрягаемых тел и частично в зонах наличия наиболее крупных по дисперсности фракций разрушения обоих тел контактного узла. По известным данным экспериментов интегральная площадь контакта прямого сопряжения поверхностей в широком диапазоне размеров неравномерностей поверхности – малая часть ($\sim 10^{-2} \ldots 10^{-4}$) от общего поля перекрытия поверхностей контактного соприкосновения тел. Деструкция – разрушение поверхностных слоёв контактно сопрягаемых подвижных тел при наличии скольжения в контактной области является весьма медленным во времени процессом, функционально зависящем от многих параметров, в том числе от модуля упругости материала тел и т. п.

Для повышения точности оценки состояния скользящей по составной слоистой ламельной поверхности – коллектора второго тела – щётки, лучшего учёта влияния фактора скольжения и более точного приближения оценок реальной нестабильности процесса коммутации тока в коллекторном скользящем токосъёме ниже, на основе марковской модели процесса, проведён анализ динамики контактного пространства, образованного скользящем по поверхности коллектора вторым телом контактной пары «щётка – коллектор», позволяющий оценить в реальном времени состояние и живучесть контактного узла токосъёма электрических машин.

Сущность модели «ламельного» контактного пространства

При работе устройств различают [2] четыре состояния механического и электрического контакта: разомкнутое, замыкание, замкнутое, размыкание. Практически на всех стадиях смены состояния происходит механический износ поверхностей, что сказывается на живучести контакта, определяемой долговечностью существования объёма элементов контактной пары. Контактное взаимодействие тел приводит к сложным физико-механическим процессам, ввиду вероятностного контактного соединения поверхностей пары элементов в области щёточного токосъёма. Скользящее взаимодействие элементов контакта ввиду фрикционного износа влечёт, как правило, изменение их свойств. Это заметно влияет на физику и механику процесса контактного взаимодействия, в том числе на состояние поверхностей, надёжности работы и живучести элементов контакта. Живучесть элементов – мера длительной и надёжной работы контакта. С позиций живучести наиболее тяжёлые условия существуют для щёточного узла как подвижного электрического контакта, выполняющего размыкание и замыкание электрической цепи, в которой протекает сильный ток. При работе таких контактов на стадиях «замыкание – скольжение – размыкание» образуются электрические дуги с температурой, приводящей к плавлению материала элементов контакта, частично испарения и изменения структуры поверхности соединения. Контроль и диагностика живучести такой контактной пары актуальна для оценки состояния коллекторных машин.

Рассматриваемая ниже математическая модель динамики прерываемого во времени скользящего контакта (например щёточно-ламельный контакт электрических машин) ориентирована на компьютерное и имитационное моделирование контактного пространства с дискретными фракциями. Сущность математической модели «ламельного» контактного пространства – математический и имитационный алгоритм, каждая компьютерная реализация которого – адекватная имитация совокупности эмиссии фракций износа в процессе функционирования моделируемого контактного пространства. Содержание и связь событий в модели, их временная динамика соответствуют содержанию и последовательности протекания процессов в реальной контактной системе. При этом предполагаем, что на каждое событие (эмиссию фракций разрушения элементов контактной пары) модель реагирует мгновенно (скачком) в некоторый момент времени.

Контактные пространства отличает сложность и разнообразие способов взаимодействия поверхностей, структуры элементов контактной пары алгоритмов протекания процессов. Выбор параметров контактного пространства в процессе оптимизации щёточного узла токосъёма является трудной задачей из-за отсутствия математического аппарата для их анализа.

Модель контактного пространства можно представить совокупностью формализованных описаний процессов, каждое из которых представляет собой симбиоз алгоритмов, состоящий из операторов и описательной части. Изменение реального контактного пространства представлено в модели совокупным поведением дискретных процессов, совмещённых в непрерывно меняющемся условном времени. Основой лаконичного описания функционирования контактного пространства служит аппарат процессов Маркова, являющийся эквивалентом соответствующих реальных процессов.

Структура «ламельного» контактного пространства

Анализ физики и механики явлений в щёточном контакте электрических машин показывает, что для общности анализа динамики областей соприкосновения поверхностей элементов контактной пары «щётка – ламель» коллектора, как и при скольжении на сплошном кольце коллектора [4 – 6], можно принять деление на два логических множества областей контакта, проводящих и не проводящих ток. Случайный процесс, основанный [7] на показательном законе описания событий, может быть применён для исследования физико-механических явлений, протекающих в контактном пространстве любого вида динамического взаимодействия.

Как и в [6], одну из областей контактного слоя (область основного контакта), частично образованную прямым соприкосновением проводящих ток выступов поверхностей элементов контактной пары, будем считать полным контактным множеством. Другая часть этого множества обусловлена контактом поверхностей этих элементов через буферную проводящую ток прослойку, образованную фракциями разрушения разной дисперсности, но в большей части, частицами износа обоих элементов пары. Вторая область – пространство примыкающих друг к другу областей воздушного зазора (т. е. областей, в которых контакт поверхностей элементов пары отсутствует). Зона отсутствия контакта – пустое множество.

Контактное пространство пары тел может находиться в любом ij-м конечном (счётном) или бесконечном числе состояний. Примем, что m – максимальное в среднем число состояний, которое определяется минимальным дисперсным размером, отторгаемых контактной парой дискретных фракций износа $V_{дф}$ и объёмом наименьшего элемента. Для элемента прямоугольной формы $V_э = a_э b_э c_э$ (произведение размеров):

$$m = \sup\{V_э / V_{дф}\} = (a_э b_э c_э) / \langle V_э \rangle, \qquad (1)$$

где $\langle ... \rangle$ – усреднение по множеству размеров фракций разрушения элементов контактной пары. При неправильной геометрии фракций средний размер фракции определится интегральной формулой вычисления объёма.

Обоснование марковского подхода

Эмиссия дискретных фракций разрушения (износа) – отрыв от объёма среды плотноупакованной структуры конденсированного тела одного из элементов контактной пары узла скользящего токосъёма, в результате скользящего взаимодействия слоёв их поверхностей, приводящая к переходу контактного множества из одного состояния в другое, происходит не в фиксированные, а в произвольные моменты времени. Это и определяет стохастичность траектории изменения состояния контактного пространства, условий передачи энергии в контактном слое и вероятностный характер процесса коммутации узлом скользящего токосъёма.

Случайный процесс скачкообразного изменения состояния контактного пространства и множества на действительной оси непрерывного времени будет, следуя классическому понятию [7], марковским, если для любого момента времени контактного взаимодействия пары элементов токосъёма условные вероятности всех состояний контактного множества **C** в будущем (при $t > t_0$) зависят только от того, в каком состоянии c_j находится контактное множество **C** в настоящем (при $t = t_0$), и не зависит от того, через какие состояния c_j оно прошло на интервале $t < t_0$, когда и каким путём контактное множество **C** пришло в настоящее состояние. Кратко – будущее марковского контактного множества зависит от прошлого только через его настоящее.

Преимущество аппарата теории марковских процессов к анализу живучести скользящего токосъёма основано на сравнительной простоте математического описания обобщённого поведения состояния контактного взаимодействия тел. Следует понимать, что описание динамики поведения контактного множества, как и обобщённое отождествление стохастичности контактного процесса в «чистом виде» с марковским является в большей или меньшей степени некоторым, хорошо совпадающим с практикой, асимптотическим приближением к реальному. При марковском анализе удобно принять, что переходы (скачки изменения) контактного множества **C** обусловлены эмиссией фракций разрушения элементов тел в контактное пространство. Это подтверждается экспериментальными данными [1 – 6].

Следуя теории марковских случайных процессов, для «ламельного» контактного пространства с дискретными состояниями и непрерывным временем изменения состояний примем, что поток фракций износа элементов контактной пары, переводящий контактное множество из одного состояния в другое, является пуассоновским не всегда, а значит, не обязательно стационарным, установившимся. Плотность его распределения описывается, в общем случае, показательным законом, в простейшем случае – законом Пуассона с характерным отсутствием последействия. Именно отсутствие последействия и позволяет при оценке настоящего состояния «ламельного» контактного множества c_i в момент t не выяснять, как и когда оно оказалось в этом состоянии. Переход контактного множества **C** из состояния c_i в c_j происходит под воздействием пуассоновского потока эмиссии фракций разрушения с интенсивностью $\lambda_{ij}(t)$. Первая же фракция разрушения контактной пары (не важно щётки или коллектора), пополнившая контактное множество или наоборот покинувшая его пространство, скачком изменяет состояние c_i контактного множества на c_j. Ветвь графа смены состояний контактного множества **C** имеет вид: $C_i \xrightarrow{\lambda_{ij}(t)} C_j$. Здесь стрелка с указанием интенсивности потока показывает направление смены состояния.

Анализ одиночного «ламельного» контактного цикла

Рассмотрим физический процесс контактного разрушения плотно упакованного тела, содержащего m фракций (определяется формулой (1)), при скольжении по периодической поверхности второго контактного тела, часто называемого коллектором (элементом, принимающим энергию тока). Процесс контактного взаимодействия тел на отдельной ламели коллектора можно анализировать при следующих предположениях.

Интенсивность простейшего пуассоновского потока фракций деструкции в контактное пространство тел равна λ, где $\lambda = \lambda_i = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ij}$ – const на всех интервалах времени «ламельного» контакта. Время контакта тела скольжения с каждой ламелью коллектора на уровне среднего значения (математическое ожидание) определяется режимом работы. Так для коллекторного электрического двигателя: $n_{\text{об}}$ – числом оборотов в минуту и конструктивными особенностями; $n_{\text{л.к}}$ – числом ламелей коллектора; $p_{\text{п.п}}$ – числом пар полюсов электрической машины:

$$\overline{T}_{\text{л}i} = 60/\left(p_{\text{п.п}} n_{\text{об}} n_{\text{л.к}}\right). \quad (2)$$

Если принять $\overline{T}_{\text{ж}}$ – среднюю длительность «жизни» скользящего тела – щётки (её значение паспортное и устанавливается производителем), то среднее число фракций, эмитируемых за время контакта щётки с каждой ламелью при средней интенсивности потока эмиссии фракций $\overline{\lambda} = m/\overline{T}_{\text{ж}}$, составит

$$\overline{\lambda}_i = m\overline{T}_{\text{л}i}/\overline{T}_{\text{ж}} = \overline{\lambda}\overline{T}_{\text{л}i}. \quad (3)$$

Итак, из полного объёма фракций (1) с интенсивностью стационарного пуассоновского потока λ любая дискретная фракция может попадать на ламель контактного пространства и участвовать в изменении состояния полного контактного множества. Время пребывания фракции в полном контактном множестве, для приближения Пуассона, распределено по показательному закону с параметром γ, а время её аннигиляции (перехода в пустое множество, разрушении до малых размеров, удаления из контактного пространства, возврата за счёт адгезии в структуру тела скольжения) или покидания – с параметром μ. Траекторию смены состояний контактного пространства в интервале единичного цикла взаимодействия тела с отдельной ламелью составного коллектора можно представить в виде простейшего кольцевого графа.

Определим вероятности состояний контактного пространства (полного контактного множества), если в начальный момент оно уже существовало с вероятностью 1, т. е. контакт тела скольжения с ламелью коллектора был обеспечен. При этом примем: C_1 – начальное состояние контактного множества (контакт пары тел обеспечен); C_2 – произошла эмиссия (или принудительная подача) в контактное пространство дискретных фракций с интенсивностью λ, формирующих контактное множество; C_3 – раздробленные (до пренебрежения учёта их участия) фракции за счёт адгезии, принудительной подачи или заменившие их транзитные фракции с интенсивностью μ стремятся восстановить начальное состояние. В соответствии с логикой изменения фрактального множества, вероятности изменения дискретных состояний ламельного контактного множества на оси непрерывного времени отразит следующая система дифференциальных уравнений Колмогорова как однородного марковского процесса [7]:

$$\left\{\begin{aligned}&\dot{p}_1(t)=\mu p_3(t)-\lambda p_1(t);\ \dot{p}_2(t)=\lambda p_1(t)-\gamma p_2(t);\\&\dot{p}_3(t)=\gamma p_2(t)-\mu p_3(t)\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

с начальными условиями: $p_1(0) = 1$; $p_2(0) = p_3(0) = 0$.

Тогда с учётом несовместности действия разных траекторий фракций, справедливо условие нормировки – равенства единице полной вероятности всех событий $p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1$ или

$$\sum_{i=1}^{3} p_i(t)=1\ \left(0\le p_i(t)\le 1;\ t\ge 0\right), \quad (5)$$

которым можно заменить любое из уравнений системы (4).

Система дифференциальных уравнений вероятности состояний контактного множества, прерываемого во времени, ламельного пространства, отражающая принятую постановку задачи, отображаемой графом состояний этого пространства, согласно правил описания динамики смены состояний, изложенных в [7], с соблюдением условия нормировки (5) и начальных условий $\{p_1(0) = 1; p_2(0) = p_3(0) = 0\}$ примет вид:

$$\left\{\begin{aligned}&\dot{p}_1(t)=\mu p_3(t)-\lambda p_1(t);\ \dot{p}_2(t)=\lambda p_1(t)-\gamma p_2(t);\\&\dot{p}_3(t)=\gamma p_2(t)-\mu p_3(t)\end{aligned}\right\}. \quad (6)$$

Используя свойства преобразования Лапласа при его применении [1, 7] для решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова путём замены изображения вероятности состояния $p_i(t)$ на функцию $\pi_i(x)$, с учётом которой изображение условия (5) меняет вид: $\sum_{i=1}^{n}\pi_i(x)=x^{-1}$, система дифференциальных уравнений (6) вырождается в систему алгебраических уравнений оценки вероятности состояний:

$$\left\{\begin{aligned}&x\pi_2(x)=\lambda\pi_1(x)-\gamma\pi_2(x);\\&x\pi_3(x)=\gamma\pi_2(x)-\mu\pi_3(x);\ \sum_{i=1}^{3}\pi_i(x)=x^{-1}\end{aligned}\right\}$$

с решением

$$\pi_2(x)=x^{-1}\left[\lambda(x+\mu)\right]/\,p(x);\ \pi_3(x)=\gamma\pi_2(x)/(x+\mu),$$

где

$$p(x) = x^2 + Ax + B = (x - x_1)(x - x_2), \quad (7)$$

($A = \lambda + \mu + \gamma$; $B = \lambda\mu + \lambda\gamma + \gamma\mu$) – квадратное уравнение с детерминантом: $\Delta = B - A^2/4 = 0{,}25(4B - A^2)$ при $p(x) = 0$. Для положительных значений параметров пуассоновского потока фракций ($\lambda > 0$; $\mu > 0$; $\gamma > 0$) анализ поведения детерминанта говорит о возможности принятия им любых значений на числовой оси $-\infty \ldots +\infty$: $\Delta \ge 0$, $\Delta = 0$, $\Delta \le 0$.

Следуя [7], для уравнения (7) с отрицательным детерминантом $\Delta \le 0$, приводящим к двум различным отрицательным корням $x_1x_2 = B$;

$$x_1 + x_2 = -A;\ x_{1,2} = \left(-A \pm \sqrt{A^2 - 4B}\right)/\,2,$$

можно получить соотношения для оценки вероятности состояния множества контактного пространства ламели:

$$\begin{aligned}&p_1(t)=1-p_2(t)-p_3(t);\\&p_2(t)=\lambda\left[\left(e^{x_1t}-e^{x_2t}\right)/(x_1-x_2)\right]+\frac{\lambda\mu}{x_1x_2}\left[1+\left(x_2e^{x_1t}-x_1e^{x_2t}\right)/(x_1-x_2)\right];\\&p_3(t)=\frac{\lambda\mu}{x_1x_2}\left[1+\left(x_2e^{x_1t}-x_1e^{x_2t}\right)/(x_1-x_2)\right].\end{aligned} \quad (8)$$

При $t \to \infty$. Ламельное контактное пространство в своём подобии асимптотически приближается к свойствам контактного множества на сплошном контактном кольце коллектора – бесконечного тела. Для примера: при $\mu = \gamma = 1$ и $\lambda = 3$ имеем $p_2(t) = p_3(t) = 3/7$, $p_1(t) = 1/7$ или $\lim_{t\to\infty}p_1(t)=p_1=1/7$, $\lim_{t\to\infty}p_2(t)=p_2=3/7$, $\lim_{t\to\infty}p_3(t)=p_3=3/7$.

При $\lambda = 0$. Когда $p_2(t) = p_3(t) = 0$, $p_1(t) = 1$, эмиссии и износа нет; тело скольжения в исходном состоянии; $\mu = 0$ – фракции не возвращаются в полное множество: $p_3(t) = 0$; $p_1(t) = 1 - p_2(t)$; $\gamma = 0$ – фракция без задержки вылетает из ламели контактного множества.

Эргодичность «ламельного» контактного пространства

Контактное пространство на ламели коллектора (поверхности с периодической структурой) представляет собой простейшее эргодическое контактное пространство. Все потоки фракций, переводящих пространство из одного состояния в другое, пуассоновские (простейшие), а все случайные состояния являются транзитивными.

Следуя этому определению, обобщённой форме записи системы однородных вероятностных уравнений с постоянными коэффициентами

$$p_i=\left(\sum_{i=1}^{n}\lambda_{ij}p_i\right)/\lambda_j;\ \lambda_j=\sum_{i=1}^{n}\lambda_{ij};\ \ (i,\,j=1,2,\ \ldots,n)$$

и, считая ламельное контактное множество простейшим, эргодическим, получим простую систему для оценки предельных вероятностей финального состояния ламельного контактного пространства:

$$\{p_1 = \mu p_3/\lambda;\quad p_2 = \lambda p_1/\gamma;\quad p_3 = \gamma p_1/\mu\}$$

или с условием нормировки:

$$\{p_1 = \mu p_3/\lambda;\ p_2 = \lambda p_1/\gamma;\ p_1 + p_2 + p_3 = 1\}. \qquad (9)$$

Из (9) следует, что $p_3 = \lambda p_1/\mu$, и условие нормировки приобретает вид

$$p_1 + (\lambda/\gamma)p_1 + (\lambda/\mu)p_1 = 1 \text{ или}$$
$$p_1\left[(\gamma\mu + \lambda\mu + \lambda\gamma)/\gamma\mu\right] = 1.$$

Для $\mu = \gamma = 1$. При $\lambda = 1$ имеем $p_1 = p_2 = p_3 = 1/3$; при $\lambda = 3$: $p_1 = 1/7, p_2 = p_3 = 3/7$; при $\lambda = 5$: $p_1 = 1/11; p_2 = p_3 = 5/11$ и т. д., т. е. процессы с p_2 и p_3 близки к равновероятным. Видим, что предельные значения вероятностей состояния ламельного контактного пространства при $t \to \infty$ и получаемые предельные вероятности финального состояния контактного пространства на сплошной бесконечной поверхности скольжения [6] аутентичны.

Смысл понятия предельной вероятности «ламельного» пространства

Предельная вероятность состояния p_i при марковском процессе образования ламельного контактного пространства с дискретными состояниями и непрерывным временем имеет смысл, аналогичный предельным значениям вероятностей для однородной цепи Маркова:

$$p_i = \bar{t}_i/\bar{\tau}_i, \qquad (10)$$

где $\bar{t}_i$ – среднее (математическое ожидание) время однократного пребывания ламельного контактного пространства **C** в состоянии c_i; $\bar{\tau}_i$ – среднее время цикла траектории блуждания контактного множества **C** относительно состояния c_i. Если учесть время пребывания **C** вне c_i, то выражение (10) приобретёт вид: $p_i = \bar{t}_i/(\bar{t}_i + \bar{\tau}_{\neq c_i})$, где $\bar{\tau}_{\neq c_i}$ – среднее время однократного пребывания ламельного контактного множества **C** вне состояния c_i. Другими словами, предельная вероятность p_i – отношение времени пребывания простейшего эргодического контактного множества **C** в состоянии c_i к сумме математических ожиданий времён $\bar{t}_i$ и $\bar{\tau}_{\neq c_i}$. Устанавливает их взаимосвязь следующая система:

$$\{\ \bar{t}_i = \bar{\tau}_{\neq c_i} p_i/(1 - p_i);\ \bar{\tau}_{\neq c_i} = \bar{t}_i(1 - p_i)/p_i\ \}.$$

Иначе, пуассоновский однородный поток фракций, переводящий ламельноое контактное множество **C** не из конечного состояния c_i, является простейшим с интенсивностью λ_i. При этом интервал времени $\bar{t}_i$ от любой точки на оси времени до ближайшего акта смены состояния пространства под действием простейшего потока фракций распределён по показательному закону с параметром равным интенсивности этого потока: $\bar{t}_i = \lambda_i^{-1}$.

Выводы

Определена статистическая аналогия подобия динамического процесса разрушения элемента тела, скользящего по ламельной составной структуре коллектора, процессу скольжения тела на сплошной, бесконечной протяжённости поверхности второго тела, в частных случаях, на контактном кольце электрической машины или поверхности скольжения движущегося тела.

Разработана аналитическая модель динамических случайных процессов в скользящем по составной ламельной поверхности второго тела токосъёмного контакта, учитывающая совокупное влияние случайных факторов в параметрах дискретного потока эмиссии фракций деструкции тел скольжения и позволяющая исследовать основные характеристики и оценивать состояние контактного узла вероятностными методами и моделированием.

Литература

1. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М. : Логос, 2000. – 607 с.
2. Мышкин Н. К. Электрические контакты / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: Изд. группа URSS, 2008. – 560 с.
3. Буланов Э. К. Контактная задача для шероховатых поверхностей / Э. К. Буланов // Техника машиностроения. – 2009. – № 1. – С. 36 – 41.
4. Деева В. С. Траекторное рассеяние фракций скользящего контакта / В. С. Деева // Доклады ТУСУРа. Ч. 1. – 2010. – № 2(22). – С. 249 – 254.
5. Деева В. С., Слободян С. М. Динамика изоморфного разрушения скользящего токосъёма / В. С. Деева, С. М. Слободян // Энергетик. – 2011. – № 9. – С. 36 – 38.
6. Слободян М. С., Слободян С. М. Модель динамики электрического контакта / М. С. Слободян, С. М. Слободян // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2.– С. 42 – 47.
7. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Академия, 2009. – 384 с.

Поступила в редакцию 16.05.2012

***Вера Степановна Деева**, аспирант.*
***Михаил Степанович Слободян**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник.*
***Степан Михайлович Слободян**, д-р техн. наук, доцент, профессор.*
Т. (382) 256-32-67, e-mail: sms_46@ngs.ru.