

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин М.С. Вопросы идентификации в аэроупругости // Чалыгинские чтения: сб. докл. / под ред. В.Г. Сувернева. — М.: ЦНТИ Волна, 1983. — С. 84–97.
2. Смыслов В.И. Некоторые вопросы методики многоточечного возбуждения при экспериментальном исследовании колебаний упругих конструкций // Ученые записки ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского. — 1972. — Т. 3. — № 5. — С. 110–118.
3. Бернс В.А. Модальная идентификация динамических систем на основе монофазных колебаний // Научный вестник НГТУ. — 2010. — № 3 (40). — С. 99–109.
4. Хейлен В., Ламменс С., Сас П. Модальный анализ: теория и испытания. — М.: ООО «Новатест», 2010. — 319 с.
5. Кононенко В.О., Плахтиенко Н.П. Методы идентификации механических нелинейных колебательных систем. — Киев: Наукова думка, 1976. — 114 с.
6. Смыслов В.И. Об экспериментальных способах исследования колебаний летательных аппаратов // Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского. — 1970. — Вып. 1217. — С. 3–63.
7. Бабаков И.М. Теория колебаний. — М.: Наука, 1968. — 560 с.

Поступила 22.11.2010 г.

УДК 621.313:534

ДЕСТРУКЦИЯ ТЕЛ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

М.С. Слободян, С.М. Слободян

Томский политехнический университет
E-mail: sms1@tpu.ru; s.m.s@ngs.ru

Предложен вероятностный подход к описанию динамики разрушения контактной пары тел в процессе скольжения малого тела по бесконечной или замкнутой поверхности другого тела. Проведен анализ возможности применения аппарата стохастических цепей для диагностики живучести скользящего контакта тел эволюционными алгоритмами.

Ключевые слова:

Стохастическая динамика, электрический контакт, эволюция, деструкция.

Key words:

Stochastic dynamics, electrical contact, evolution, destruction.

Введение

Поток фракций деструкции (разрушения) тонких поверхностных слоёв тел возникает во всех случаях взаимного относительного перемещения, соприкасающихся в процессе контакта, твердых тел любой физической природы. Можно привести много примеров такого контактного взаимодействия: релейные элементы, контакторы, силовые переключатели, герконы и т. п. в электронике и электротехнике; износ электродов в устройствах точечной контактной сварки и другие весьма разнотипные области науки и техники. Деструкция поверхности контактного взаимодействия твердых и упругих тел, называемая износом, обусловлена физико-механическими факторами различной природы.

Именно эмиссия фракций деструкции — разрушения тонких поверхностных слоёв, вступающих в контакт тел, является причинно-следственным отражением износа — изменения объёма подвижных тел в процессе контакта, вызываемым в большей степени процессом скольжения поверхности одного тела с соприкасающейся с ней поверхностью другого тела (трением скольжения) и в меньшей степени — процессом качения элементов одной поверхности по поверхности другого тела (трением качения).

Для процесса скольжения характерно то, что области структур поверхностных слоёв тел, находя-

щихся в контактном взаимодействии, в течение всего процесса скользящего взаимодействия каждый раз испытывают контактное соприкосновение со структурно разными областями взаимно видоизменяющегося, ввиду силовой деструкции, двумерного поля поверхностей обоих, находящихся в скользящем контактном соприкосновении, подвижных тел. Вариации двумерной структуры поверхностных слоёв обоих тел вызваны, в большей степени, взаимным срезанием (ломкой) неравномерностей поверхностей обоих тел в контактном пространстве.

В отличие от скольжения, процессу качения поверхности одного подвижного тела по поверхности другого, в частном случае, неподвижного, в большей степени, присущи объёмные деформационные явления (упругая и пластическая деформации) и, в меньшей степени, срез и выкрашивание отдельных фракций, приводящие к дроблению неравномерностей двумерной структуры поверхностных слоёв обоих тел.

В общем случае, в зависимости от структуры поверхностных слоёв контактно взаимодействующих тел, в контактном пространстве на практике, в реальных условиях, при силовом контактом динамическом взаимодействии материальных тел присутствуют оба процесса с разной степенью приоритета и превалирования по рангу влияния и веса деструкции.

Одной из важных проблем прогноза является получение достоверной оценки состояния элементов контактной пары тел для принятия решения о надёжности [1–7]. Сложность оценки степени деградации — износа любого (механического или электрического), в общем случае, в большей или меньшей мере скользящего контакта (СК) тел заключается в вероятностном характере распределения числовых значений широкого набора параметров, описывающих совместное взаимодействие элементов тел контактной пары. Электрический, как и механический, СК имеет множество показателей, находящихся во взаимном противоречии, и обобщенное решение может быть найдено либо компромиссным решением, либо привлечением методик глобальной оптимизации основанных на выборе или задании целевых функций.

Трудности при решении задачи формирования оптимального прогноза состояния СК тел состоят, частично, ввиду метрологической недоступности, в отсутствии возможности аналитического описания закономерностей ряда процессов, протекающих в области взаимодействия поверхностей тел контактной пары, частично, в недостатке априорной информации, необходимой для оценки экстремума функции поведения и принятия оптимального варианта диагностики технического состояния СК. В основе известных методик формирования прогноза лежит достаточно сложная схема расчёта, которая охватывает все части и детали элементов контактной пары, за исключением явлений, протекающих в области контактного слоя [1–7].

Вероятностная модель физического процесса в СК

Остановимся на некоторых деталях физического процесса деградации элементов электрического СК. Исследования, например [1–5] щётчного СК электрических машин показывают, что вещество скользящего элемента (щётки) переносится и оседает на вращающемся коллекторе машин не в виде сплошной плёнки, а в виде отдельных фрагментов. Отмечен также перенос фракций деградации коллектора на контактную поверхность других, смежных щёток. Оценка явления говорит о том, что миграция фракций зависит от параметров тока, протекающего через элементы контактной пары, и равна $\sim 0,03$ мг/ч [2]. Анализ пространственного совмещения поверхностей элементов скользящей контактной пары «щётка — коллектор» показывает, что область контакта поверхностей тел СК состоит из следующих, важных для последующего математического описания, трёх зон.

Одна из зон контакта образуется непосредственным (прямым) соприкосновением, проводящих ток, неравномерностей поверхности элементов контактной пары. Назовем эту область зоной основного контакта или областью полного контактного множества. Вторая зона обусловлена соприкосновением части поверхностей этих элементов через буферную, проводящую ток, прослойку,

образованную дискретными фракциями разной дисперсности, но в большей части, локально точечными частицами механической деградации материалов обоих элементов контактной пары. Эта зона буферного контакта в большей части расширяющего область полного контактного множества (увеличивающего его полноту). Третья — представляет собой пространство, примыкающих друг к другу, областей воздушного зазора (т. е. областей, в которых контакт поверхностей элементов СК отсутствует), назовем её пустой зоной контакта или пустым контактным множеством.

Процесс изменения числа контактных областей (изменения мощности) полного, проводящего ток, контактного множества и их исчезновения или реорганизации в мелкодисперсные, ничтожные для физического учета, фракции и последующего удаления из области протекания тока, то есть, перехода таких областей в состояние пустого, не проводящего ток, множества, является дискретным и флуктуирующим. Процесс изменения числа контактных областей за счёт эмиссии фракций деградации в контактное пространство и во вне его, а также смены массива случайного поля распределения контактных областей контактной пары по времени весьма краток.

Длительность отдельного акта «рождения — жизни — гибели» фракции и динамика смены состояний определена скоростями взаимного перемещения, дробления или, наоборот, коагуляции частиц материала (разные упругие свойства), размерами и их геометрией. Она является результатом проявления случайности траекторий эмиссии фракций деградации в контактное пространство.

Анализ физики и механики явлений в СК показывает, что чёткого разделения областей соприкосновения поверхностей элементов контактной пары на три зоны провести практически невозможно в динамическом режиме работы СК. В проводимом ниже анализе динамики поведения электрического СК принимается наличие двух зон, без уточнения, какая из них в конкретный момент является преобладающей. Другими словами, ниже, для общности анализа, принято деление на два логических множества областей СК, проводящих и не проводящих ток. Возможность существования третьей зоны подразумевается на интервале вероятностного перехода части случайного контактного пространства из одной основной зоны, например, полного контактного множества в другую основную зону — пустого множества — отсутствия контакта на части поверхности элементов контактной пары СК.

Ниже показано, что случайный процесс, основанный на показательном законе событий и используемый [6, 7] для описания биологических процессов размножения и гибели в природе и обществе, может быть применен для исследования, описания и диагностики физико-механических явлений, происходящих в пространстве СК.

Сценарии смены состояния контактного пространства

Примем следующие обобщения при анализе. Контактное пространство ограничено размерами области пересечения малого тела скользящего по бесконечной, в направлении скольжения, поверхности второго тела контактной пары. (Форма поверхности второго контактного тела может быть любой, замкнутого типа: кольцевой, типа поверхности листа Мёбиуса, прямолинейной бесконечной плоскости (например, провод контактной сети) и т. п.). Это предельные пространственные размеры контактного пространства и мощности контактного множества. Содержащиеся внутри этого пространства точечные области разного размера являются зонами соприкосновения поверхностей обоих элементов контактной пары. Это области полного контактного множества, образующего контактный континуум. В это множество, как логически, так и физически, входят малого размера «точечные» контактные области, образованные примыканием поверхностей через буферную прослойку из фракций деструкции поверхностных слоёв обоих тел контактной пары, как результат их активного участия в формировании контактного множества прямым соприкосновением неравномерностей поверхностей, а также путем коагуляции, взаимного слипания и прилипания к областям прямого контакта поверхностей.

Фракции продуктов деструкции, попавшие в эти области, в зависимости от размера фракции, образуют области контактного множества. Крупные, соизмеримые с зазором между контактирующими поверхностями, переводят области пустого в область полного множества, увеличивая его мощность. Мелкие фракции, даже прилипая к пустому множеству, не участвуют в изменении пустого множества, только по вероятности приближая некоторые области множества к изменению состояния. Прилипая к полному множеству, фракции изменяют, в меру своей «полноты», его мощность, т. е. переводят его в другое состояние.

Другой вариант. Часть фракций деструкции поверхностных слоёв тел контактной пары за счёт воздействия ударов и вибрации при скользящем движении, а также центробежной силы (при вращении второго тела) покидает контактное пространство навсегда. Другая часть мелких фракций, где силы адгезии к поверхности скольжения преобладают над влиянием центробежных сил, будет участвовать в следующих циклах (например, на следующем обороте вращения) формирования структуры контактного пространства СК.

Модель деструкции элементов контактной пары

Общий случай. Представим модель деструкции элементов поверхностных слоёв тел контактной пары как случайный процесс их распада на некоторые дискретные образования – фракции продуктов разрушения. Тогда вероятность распада или эмиссии фракций деструкции материала тел кон-

тактной пары за предельно малый промежуток времени dt представится соотношением: λdt , где λ – в общем случае, постоянная величина (коэффициент), в данном случае, интенсивность эмиссии в контактное пространство фракций деструкции.

Для упрощения анализа примем, что эта величина характеризует общий поток фракций деструкции как интенсивность эквивалентного процесса эмиссии продуктов разрушения материала обоих тел контактной пары в виде дискретных фракций, образующихся при скользящем контактном взаимодействии поверхностей тел. В общем случае, переход на группу из k активных источников эмиссии дискретных частиц индивидуальной интенсивности λ_i в контактное пространство, с учетом марковского свойства случайного потока событий, результат примет вид соотношения

$$\lambda = \sum_{i=0}^k \lambda_i.$$

Оценка размерности дискретных фракций деструкции

Контактное пространство пары тел СК может находиться в любом ij -м конечном или бесконечном числе состояний. Поэтому, для конкретной контактной пары примем, что m есть максимальное в среднем число состояний, которое определяется минимальным дисперсным размером, отторгаемых контактной парой, дискретных фракций деструкции $V_{дф}$ и величиной объёма малого тела $V_M = a_M b_M c_M$ (произведению габаритных размеров)

$$m = \sup \{V_M / V_{дф}\} = \{(a_M b_M c_M) / \langle V_{дф} \rangle\}.$$

Здесь скобки $\langle \dots \rangle$ – знак усреднения по множеству значений размеров дисперсных дискретных фракций продуктов разрушения. Средний размер дискретной дисперсной фракции деструкции при неправильных геометрических формах определится как математическое ожидание по интегральным формулам вычисления объёма.

В каждый момент времени контактное пространство находится в одном из ij состояний. С течением времени будут происходить случайные переходы из одного состояния в любое другое. Поскольку n_i состояние контактного пространства в некоторый момент времени определяет лишь вероятность $p_{ij}(t)$ того, что через промежуток времени t контактное пространство будет в состоянии n_j . Эта вероятность не зависит от «прошлого» течения случайного процесса, из-за того, что процесс формирования контактного пространства является фактически марковским. Вероятности $p_{ij}(t)$ являются переходными вероятностями смены состояний СК. Переходные вероятности $p_{ij}(t)$ косвенно отражают динамику изменения структуры контактного множества и будут удовлетворять, в зависимости от сложности описания процесса деструкции, конечной или бесконечной системе линейных однородных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Закономерности динамики контактного пространства

Рассмотрим физико-механические аспекты и динамику взаимодействия элементов СК в предельно малом по объёму контактном пространстве. Динамика формирования контактного пространства представляет собой случайный дискретный процесс, в котором участвуют фракции деструкции элементов контактной пары, изменяя полноту контактного множества. В итоге, эти же, но видоизмененные, дискретные фракции также в случайные моменты времени под воздействием разных факторов покидают контактное пространство. Центробежная сила, движение и вибрации — основные факторы удаления дискретных фракций деструкции с ослабленными физическими и адгезионными связями из контактного пространства.

Форма дискретных фракций изменяется в контактном пространстве под действием сил давления, влияния теплового и электромагнитного поля, вызванных трением и протеканием тока. Упругие фракции большего размера распадаются до средних размеров дискретного контактного множества. Другие, более пластичные, фракции — до весьма малых размеров, которые из-за малости геометрии заполняют области пустого множества. Они очень редко включаются в процесс передачи тока. Чаше, из-за слабой адгезии к поверхностям элементов, удаляются центробежной силой и вибрацией из области контакта. В любом случае, полнота контактного множества уменьшается, освобождая место для приема новых фракций деструкции тел.

Примем за λ_i — интенсивность потока дискретных фракций деструкции, пополняющих контактное множество, и μ_i — интенсивность потока фракций, покидающих контактное пространство (увеличивающих пустое множество). Тогда в ходе формирования случайного дискретного контактного множества необходимо учитывать следующее [6]:

- если в некоторый момент времени t контактное множество как физическая система находится в состоянии i ($i=1,2,\dots$), то вероятность перехода этого состояния множества в состояние $i+1$ (или $[i \rightarrow i+1]$) в малом временном интервале $[t, t+\Delta t]$ пропорциональна величине $\lambda_i \Delta t$;
- если в момент времени t множество находилось в состоянии i ($i=1,2,\dots$), то вероятность перехода $[i \rightarrow i-1]$ на интервале $[t, t+\Delta t]$ равна $\mu_i \Delta t$;
- вероятность перехода контактного пространства в любые другие состояния, отличающиеся от приведенных выше, пренебрежительно мала ≈ 0 ;
- вероятность сохранения прежнего состояния составит $1 - (\lambda_i + \mu_i) \Delta t$;
- состояние физической системы при $i=0$ считается [7] поглощающим. Если динамика контактного множества пришла в такое состояние (пример: полный износ малого тела скольжения), то процесс останавливается.

Эти условия физически отражают следующее:

во-первых, при $t=0$ контактное множество достоверно находится в некотором состоянии x_k ; во-вторых, вероятность перехода из состояния x_k в любое другое возможное состояние, в общем случае, зависит от момента времени и для малого временного интервала Δt определяется его величиной, которая очень мала, т. е. $\Delta t \rightarrow 0$. Из условий также следует, что вероятность смены состояния за малый интервал времени пропорциональна его величине.

В начальный нулевой момент времени (предшествующий эксплуатации контактного тела, например, электрической щётки или диагностики СК) точечное множество контактного пространства, как физическая система, находится в некотором состоянии i_0 [$0 < i_0 < \infty$] и, следовательно, начальные условия можно записать в виде

$$p_i(0) = \{1, \text{ для } i=i_0 \text{ и } 0, \text{ для } i \neq i_0\}.$$

Так как вероятности перехода контактного множества из одного состояния в другое состояние неотрицательны $p_{ij}(t_0, t) \geq 0$, то должно выполняться условие нормировки

$$\sum_i p_{ij}(t_0, t) = 1; \quad p_{ij}(t_0, t) \geq 0.$$

Тогда для вероятностей перехода справедливо соотношение

$$p_{kk}(t) = \sum_{j(i \neq k)} p_{kj}(t) \geq 0, \quad p_{kj}(t) \geq 0.$$

При соответствии динамики случайных состояний контактного множества свойствам марковского процесса, дифференциальное уравнение вариаций контактного пространства может быть представлено в виде

$$\dot{p}_i(t) = \lambda_{i-1} p_{i-1}(t) - (\lambda_i + \mu_i) p_i(t) + \mu_{i+1} p_{i+1}(t), \\ (i = 1, 2, \dots).$$

Точка над параметром указывает на производную по времени. Для произвольных интенсивностей потока (функций времени) $\lambda_i(t)$ и $\mu_i(t)$ решение дифференциального уравнения в общем случае затруднено.

Рассмотрим характерные для СК ситуации.

а) Предельный случай (стадия близкая к вырождению процесса износа малого тела СК): при $i=0$ уравнение упрощается:

$$\dot{p}_0(t) = -\lambda_0 p_0(t) + \mu_1 p_1(t).$$

Если строго рассматривать конкретный случай (момент полного износа), когда состояние $i=0$ является поглощающим, то ясно, что в момент полного износа $\lambda_{-1} = \lambda_0 = \mu_1 = 0$. Другими словами, процесс износа завершился, а с ним и все процессы сопутствующие вариациям контактного множества в рассматриваемых аспектах. В итоге имеем: $\dot{p}_0(t) = \mu_1 p_1(t)$.

б) Линейный процесс динамики изменения контактного множества.

В этом случае, интенсивности фракций потока пополнения и потока убывания областей контактного множества — линейные функции состояния:

$\lambda_i = \lambda_0$; $\mu_i = \mu_0$; $\lambda_0 = \text{const} > 0$; $\mu_0 = \text{const} > 0$.

При начальном условии процесса СК $x(0)=i_0=1$ решение уравнения состояния контактного множества, по аналогии с приведённым в работе [6], имеет вид:

$$\begin{cases} p_0(t) = a(t) \\ p_i(t) = [1 - a(t)][1 - b(t)]b^{i-1}(t), \quad (i=1, 2, \dots), \\ p_{ij}(t) = \sum_{ij} C_n^i C_{i-1}^{j-n-1} [a(t)]^{i-n} [b(t)]^{j-n} [1 - a(t) - b(t)]^n, \\ i \geq j. \end{cases}$$

Здесь C_m^n — сочетание из m по n , отражающие многовариантность и многомерность образования структуры контактного множества. В этих выражениях для упрощения записи введены обобщающие параметры:

$$a(t) = \frac{\mu \{1 - \exp[(\lambda - \mu)t]\}}{\mu - \lambda \exp[(\lambda - \mu)t]}; \quad b(t) = \frac{\lambda}{\mu} a(t).$$

Введённый параметр $a(t)$ есть вероятность перехода (в предельном случае) $p_0(t)$ при $\lambda = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$. Математическое ожидание и дисперсия случайного процесса динамики контактного множества определяются выражениями:

$$\begin{aligned} M[\zeta(t)] &= m_0(t) = \exp[(\lambda - \mu)t]; \\ \sigma_\zeta^2(t) &= \frac{\lambda + \mu}{\lambda - \mu} \{ \exp[(\lambda - \mu)t] - 1 \} \exp(\lambda - \mu). \end{aligned}$$

Отсюда видно, что математическое ожидание, характеризующее средний уровень случайного векторного процесса $\zeta(t)$ формирования контактного множества, есть функция времени и соотношения интенсивностей потоков притока и оттока фракций деструкции элементов тел контактной пары. При равенстве интенсивностей притока и оттока фракций в контактном пространстве $\lambda = \mu$ и единичном начальном состоянии $x(0)=1$ получим стабильное контактное пространство при нулевой интенсивности относительного роста мощности контактного множества со средним значением $m(t)=m_0(t)=m_0=\text{const}$. Дисперсия процесса эмиссии фракций деструкции будет линейно расти во времени $\sigma_x^2(t)=2\lambda(t)$.

Для важного в практике случая — постоянства и стабильности состояния пространства СК можно найти вероятность того, что к некоторому времени t контактное пространство, точнее, малое контактное тело или тело с меньшим модулем упругости будет полностью изношено или контактное множество, как физическая система, придёт в состояние $i=0$ полного вырождения потока частиц деструкции

$$p_0(t) = \mu \frac{1 - \exp[(\lambda - \mu)t]}{\mu - \lambda \exp[(\lambda - \mu)t]}.$$

Вероятность того, что малое контактное тело или тело с меньшим модулем упругости, а точнее, контактная пара когда-нибудь износится (другими словами, случайный процесс контактного токо-

ма когда-нибудь выродится) найдется переходом к предельному случаю, устремляя время к бесконечности, т. е. при условии $t \rightarrow \infty$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_0(t) = \{1, \text{ при } \lambda < \mu \text{ и } \mu/\lambda, \text{ при } \lambda > \mu\}.$$

Эти соотношения подтверждают реальность того, что, в конечном счёте, в результате любого вида эксплуатации СК одно из тел контакта гарантировано, с вероятностью, равной 1, изнашивается, если в контактном пространстве интенсивность оттока фракций деструкции равна или превышает интенсивность их притока. Если интенсивность притока фракций деструкции, образующих контактное пространство, превышает интенсивность их оттока, то вероятность вырождения и время «жизни» контактной пары равны отношению интенсивностей этих потоков.

Динамика фрактальности контактного пространства

При решении контактной задачи необходимо учитывать динамику взаимодействия поверхностей тел контактной системы, в том числе, фрактальный распад поверхности тел контактной пары. Следовательно, анализ должен проводиться на основе динамических дифференциальных уравнений контактного взаимодействия, учета распада тел контактной пары на фракции деструкции и их участия в процессе образования контактного слоя. Динамика дифференциальных уравнений должна отражать изменение контактного пространства слоя совмещения поверхностей тел.

При описании неравновесных систем, а контакт тел является далекой от равновесия системой, не следует ждать строго линейной функциональной зависимости от параметров и условий работы. Поэтому формализм дифференциальных уравнений, используемых в линейной области термодинамики и теории необратимых процессов, в полной мере может не соответствовать реальному образованию контактного слоя. Следует учесть, что структура пространства контактного слоя является по своей природе дискретной, случайно изменяющейся и фрактальной. Скорость образования множества малоразмерных зон контакта должна превышать скорость их распада и реорганизации или быть соизмеримой с ней. В конечном итоге в результате эволюции процесса образования контакта отношение скоростей «зарождение — распад» будет стремиться к равновесному в среднем постоянному значению.

Дифференциальное уравнение динамики структуры дискретных фракций в процессе разрушения шероховатостей в контактном слое, с учетом i возможных источников эмиссии дискретных контактных фракций в контактное множество, можно представить наподобие канонического разложения В.С. Пугачева [7]:

$$\dot{n}_i(t) = [g_i(t) - d_i(t)]n_i(t) + \sum_{i \neq j} v_{ij}(t)n_j(t),$$

где $\dot{n}_i(t)$ — изменение во времени плотности мощности фрактальных областей контактного множества; $g_i(t)$ — скорость генерации дискретных кон-

тактных фракций (изменение мощности полного контактного множества); $d_i(t)$ — скорость их распада — изменение мощности областей пустого множества (отсутствие контакта) или удаления части фракций распада из пространства контактного слоя; третье слагаемое дифференциального уравнения — суммарный вклад других j факторов малосущественного, но для общего учета необходимого влияния пыли, влаги, ионизации среды и пр.

В заключение отметим, что предложенная модель образования контактного пространства позволяет обосновать статистику распределения экспериментальных данных при исследованиях и измерениях контактными методами и, в частном случае [8], управления электрическим воздействием на свойства соединения слоев материала.

Эволюционный алгоритм диагностики

Процедуру диагностики СК целесообразно строить так, чтобы на каждой итерации процесса диагностики объём информации и точность оценки состояния СК возрастали. Основными направлениями процесса формирования оценки оптимальной диагностики является генерация многообразия путей решения и усечение множества неоптимальных путей поискового движения. Такая стратегия оптимальной диагностики СК хорошо соответствует логике эволюционных алгоритмов принятия решений (алгоритмы биологической селекции и отбора) [6, 7].

Анализ говорит о несовершенстве некоторых вариантов принятия решений. Так, при установлении оптимального контактного режима деструкция элементов СК будет минимальной, а время жизни контактной пары, как контактной популяции — максимальным. Ранняя замена такой оптимальной пары будет являться нерациональным решением, не отвечающим понятию критерия оптимальности. В таком случае прогнозное решение по оперативному контролю эффективности взаимодействия элементов СК в реальном времени будет лучшим решением.

Выводы

Определено статистическое соответствие процесса скользящего механического и электрического контакта пары тел стохастическому дискретному потоку. Показано, что процессы образования дискретной стохастической структуры, проводящей ток в переходном слое скользящего контакта, носят случайный характер.

Создана модель для анализа стохастического скользящего взаимодействия элементов контактной пары, учитывающая совокупное влияние физических и механических факторов. В модели отражено поведение характеристик основных динамических процессов, протекающих в пространственной области контактного слоя, и разработан математически формализованный аппарат для исследования динамики и живучести контактной пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. — М.: Издат. группа URSS, 2008. — 560 с.
2. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин. — М.: Энергия, 1974. — 272 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1978. — 832 с.
4. Демкин Н.Б. Фактическая поверхность касания твердых поверхностей. — М.: АН СССР, 1962. — 111 с.
5. Плохов И.В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъёма турбогенераторов: автореф. дис.... докт. техн. наук. — СПб.: СПбГТУ, 2001. — 36 с.
6. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. — М.: Советское радио, 1977. — 488 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Академия, 2005. — 576 с.
8. Слободян М.С. Управление свойствами соединений сплавов циркония. — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. — 108 с.

Поступила 16.09.2010 г.