

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 518.12+004.21

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 15.03.2017, в окончательном варианте – 06.06.2017.

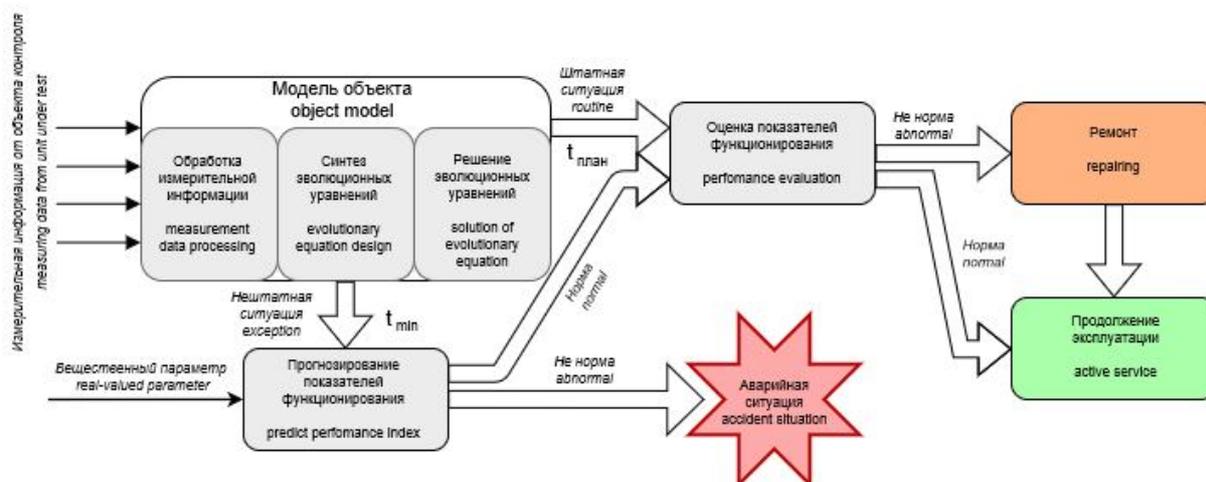
Кочнев Сергей Владимирович, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, 129226, Российская Федерация, г. Москва, пр. Мира, 125,
начальник отдела, ORCID 0000-0001-6226-7518, e-mail: s.v.ko@mail.ru

Лансарь Алексей Петрович, Управление ФСТЭК России по Южному и Северо-Кавказскому федеральным округам, 344079, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Ярослава Галана, 1е/25,
кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела, ORCID 0000-0003-2273-725X,
e-mail: lapsar1958@mail.ru, https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=508081&pubrole=100&show_refs=1&show_option=0

Существующий подход к обеспечению работоспособности сложных технических объектов (СТО) основан на использовании системы планово-предупредительного обслуживания и ремонта. Такой подход является затратным и недостаточно эффективным. Кроме того, он не может быть успешным при эксплуатации СТО в нештатных условиях. Поэтому актуально создание систем контроля данного типа объектов, обеспечивающих оперативную оценку их текущего состояния; получение прогнозов поведения объектов контроля в будущий период времени для использования проактивного (упреждающего) управления. Обоснована целесообразность использования метода оценки состояния СТО, основанного на диффузионных марковских моделях и решении эволюционных уравнений в параметрическом виде. Предложен подход, позволяющий компенсировать несовершенство математического аппарата решения диффузионных уравнений, значительные вычислительные сложности при их численном решении. Проведен анализ основных эксплуатационных характеристик СТО и способов их оценки. Синтезирована модель оценки состояния СТО в виде параметризованных эволюционных уравнений. Показана обоснованность использования применяемого метода решения таких уравнений и получения стохастических характеристик исследуемого объекта в реальном масштабе времени. Предложенный параметрический подход позволяет значительно снизить время оценки прогнозного состояния объектов при обеспечении достаточно высокой точности прогнозов. В нормальных условиях эксплуатации этот подход служит основой для перехода к обслуживанию СТО по фактическому состоянию, а при нештатных условиях – позволяет повысить уровень готовности СТО к использованию по назначению и безопасность их эксплуатации.

Ключевые слова: технический объект, параметрическая оценка, марковские модели, эволюционные уравнения, плотность вероятности, стохастические характеристики, система контроля, нештатная эксплуатация

Графическая аннотация (Graphical annotation)



PARAMETRIC APPROACH TO ASSESS THE STATE OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS
ON THE BASIS OF EVOLUTION EQUATIONS

The article has been received by editorial board 15.03.2017, in the final version – 06.06.2017.

Kochnev Sergey V., State Research Institute of Instrument Making, 125 Mir Ave., Moscow, 129226, Russian Federation,

head of department, ORCID 0000-0001-6226-7518, e-mail: s.v.ko@mail.ru

Lapsar Aleksey P., Administration of FSTEC of Russia by South and North Caucasian Federal Districts, 1e/25 Yaroslav Galan St., Rostov-on-Don, 344079, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Chief of Department, ORCID 0000-0003-2273-725X, e-mail: lapsar1958@mail.ru, https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=508081&pubrole=100&show_refs=1&show_option=0

The existing system of ensuring operability of complex technical objects based on the system of scheduled preventive servicing and repair is costly and insufficiently effective, and it cannot successfully function in the conditions of emergency operation. Therefore, development of the perspective feed-forward control systems providing operational assessment of a status and receipt of aprioristic information on behavior of an object of control in the future is urgent. Research objective is to develop a method of operational assessment of a condition of complex technical objects for synthesis of the control systems, which are effectively functioning in the conditions of emergency operation. The evaluation method of a condition of objects that is based on diffusive Markov models and the solution of the evolutionary equations in a parametrical type is used. The approach, allowing to compensate imperfection of the mathematical device of the solution of the diffusive equations and big computing difficulties is offered. The analysis of the main operational characteristics of complex technical objects and methods of their assessment is carried out, the model of assessment of a condition of objects in the form of the parametrized evolutionary equations is synthesized. The method of the solution of such equations and obtain of stochastic characteristics of the studied object in real time is offered. The offered parametrical approach allows to lower time of assessment of a condition of objects considerably and provides rather high precision. In normal conditions of operation it forms a basis for transition to servicing in real situation, in emergency conditions – allows to increase the level of readiness of objects for proper use and safety of their operation.

Keywords: technical object, parametrical assessment, Markov models, evolutionary equations, probability density, stochastic characteristics, control system, non-standard operation

Сложившаяся в настоящее время ситуация в реальном секторе экономики требует новых подходов к обеспечению работоспособности и постоянной готовности для использования по назначению сложных технических объектов (СТО). К СТО относятся авиационные и космические комплексы, объекты энергетики, системы связи и телекоммуникаций и другие. Такие объекты содержат в своем составе большое количество разнородных узлов, элементов и блоков, в т.ч. радиоэлектронных. По существу, СТО являются стохастическими системами, для которых можно оценить лишь статистические характеристики в отношении вероятностей отказов оборудования, особенно при эксплуатации его в нештатных условиях. Традиционная система планово-предупредительного обслуживания и ремонта СТО предусматривает углубленную оценку состояния таких объектов через определенные промежутки времени. При этом количество измерительных операций может достигать нескольких сотен и даже тысяч, а время измерений (диагностики) – составлять от сорока до девяноста процентов всего времени на обслуживание СТО [6, 14]. На основании оценки технического состояния делаются заключения об исправности СТО на период вплоть до следующего момента его контроля / обслуживания. Во время проведения контроля СТО они (или их отдельные части) обычно выводятся из эксплуатации, что может нарушать технологические и иные процессы. Отметим, что при эксплуатации СТО с истекшими сроками гарантии, период между моментами контроля обычно сокращается [8, 12, 21]. Это, в свою очередь, ведет к повышению интенсивности и стоимости обслуживания, что делает планово-предупредительную систему неэффективной и весьма затратной.

Еще сложнее обеспечить нормальное функционирование СТО при нештатной эксплуатации (эксплуатации в нештатных условиях). Такие условия могут быть следствием следующих причин: резкой смены режима функционирования (использования); нерегламентированных воздействий на объект, в том числе и преднамеренных. Эксплуатация СТО в нештатных условиях характеризуется дефицитом времени на принятие решений о возможности их дальнейшего использования [1, 7, 14]. После нерегламентированных воздействий СТО, как правило, считается неисправным независимо от реального состояния. Поэтому получение априорных (прогнозных) сведений о характеристиках, описывающих состояние объекта, является необходимым условием для оптимального планирования его дальнейшей эксплуатации. Существующие системы контроля (диагностики) фиксируют состояние СТО на момент проверки и не обеспечивают удовлетворения потребностей в оценке значений их характеристик в будущие моменты времени [9, 16].

Сейчас наблюдается общая тенденция к продлению сроков эксплуатации и увеличению количества используемых СТО с истекшим сроком гарантии. Это предъявляет дополнительные требования к системе обслуживания и организации оценки состояния СТО. Иными словами, существует противоречие

между данными о техническом состоянии СТО, получаемыми с помощью существующих систем контроля, и практическими потребностями в получении априорной (прогнозной) информации о динамике изменения в будущие моменты времени основных характеристик исследуемых объектов. Как следствие существует необходимость в создании систем контроля с функциями экспертных систем на основе эффективных моделей прогноза. При этом с целью повышения оперативности измерительного контроля требуется заменить большое количество контролируемых величин на малое число обобщенных параметров или характеристик. Очевидно, что такая замена должна обеспечить приемлемую достоверность оценки состояния объектов [7, 9, 21].

На первый взгляд кажется, что задача снижения размерности пространства показателей, характеризующих состояние СТО, может быть решена с использованием метода главных компонент или главных факторов. Однако такой подход имеет существенные недостатки: объем контрольных операций при этом не уменьшается; значительное преобладание «нагрузок» на первые несколько главных компонент или главных факторов имеет место далеко не всегда; содержательная интерпретация главных компонент и главных факторов чаще всего является достаточно затруднительной [19, 21].

В связи с этим целесообразно применение для диагностических и прогнозных целей интеллектуальных экспертных систем (ИЭС). Одним из наиболее перспективных направлений синтеза ИЭС является использование моделей оценки на основе диффузионных марковских процессов [2, 14, 15]. Однако в настоящее время такие подходы не нашли широкого применения по следующим причинам: несовершенство математического аппарата решения диффузионных уравнений; значительные вычислительные сложности при решении таких уравнений.

Целью данной статьи является разработка метода оперативной оценки состояния СТО для синтеза систем контроля, эффективно функционирующих в условиях нештатной эксплуатации объектов.

Выбор модели оценки эксплуатационных характеристик СТО. В условиях штатной эксплуатации СТО их основными эксплуатационными показателями являются: момент начала очередного комплексного технического обслуживания СТО; объем такого обслуживания; продолжительность времени, в течение которого можно эксплуатировать СТО после окончания его гарантийного срока (продленный срок службы).

В условиях нештатной эксплуатации к эксплуатационным показателям относят следующее: время, в течение которого СТО сохранит готовность к выполнению своих функций; вероятность сохранения работоспособного состояния СТО при отсутствии аварийных ситуаций; устойчивость СТО к несанкционированному (аварийному) воздействию; вероятность сохранения работоспособного состояния СТО после «аварийной ситуации»; потенциальную опасность эксплуатации СТО для других объектов, персонала и пр. [4, 14].

Как правило, в рамках модели «параметр – поле допуска» определяются следующие параметры: момент начала комплексного обслуживания СТО; объем обслуживания; продолжительность периода времени, в течение которого можно эксплуатировать изделие после окончания гарантийного срока; вероятность сохранения работоспособного состояния СТО при отсутствии аварийной ситуации; вероятность сохранения работоспособного состояния СТО после аварии. В то же время другие показатели СТО оцениваются на основе модели «нагрузка – несущая способность».

Все названные эксплуатационные показатели можно охарактеризовать основными характеристиками: временем T выхода параметра $x(t)$, характеризующего состояние объекта, за пределы допуска; вероятностью U работоспособного состояния объекта в заданный момент времени (параметрическая надежность); границами G_D допусков на параметры; вероятностью $P(S \geq R)$ превышения уровня воздействия (S) на объект над его устойчивостью к воздействиям (R).

Названные характеристики можно оценить на основе плотности вероятности исследуемого стохастического процесса $p(x, t)$, которая является его наиболее информативной характеристикой. По результатам оценки текущего значения четырех характеристик, указанных в предыдущем абзаце, и их поведения в будущие моменты времени вырабатываются рекомендации по дальнейшему использованию СТО.

При использовании модели «параметр – поле допуска» считается, что работоспособность объекта обеспечивается поддержанием его характеристик (параметров) в допустимых границах. Отказ СТО характеризуется как выход хотя бы одного параметра за эти границы. При этом условие работоспособности будет:

$$P(t) = p\{x(t) \in G_D, t = [t_0, T]\},$$

где $x(t) \in R^r$ – r -мерный вектор состояния СТО, $P\{\cdot\}$ – вероятность соответствующего события.

При использовании модели «нагрузка – несущая способность» исходят из того, что при эксплуатации объекта не наступит ни одно из предельных состояний [14] $S(x) \leq R(x)$, где $S(x)$ и $R(x)$ – случайные величины соответственно нагрузки (воздействия) и несущей способности (устойчивости к воздействиям).

Для использования рассмотренных моделей надежности синтезируем модель изменения характеристик исследуемого СТО. Для этого рассмотрим технический объект, представляющий собой сложную стохастическую систему. Требуется исследовать процесс изменения состояния этой системы во времени. Наиболее приемлемой моделью для исследования поведения стохастической системы являются диффузионные марковские процессы, описываемые с помощью уравнений Фоккера – Планка – Колмогорова [10, 11, 14].

В реальных условиях эксплуатации технических объектов возникает необходимость учета параметров ω . Они характеризуют условия эксплуатации, воздействие на объект со стороны внешней среды, начальные и граничные условия задачи и т.д. В этом случае уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова, моделирующие исследуемый процесс, необходимо записать в виде зависимости от m -мерного параметра $\omega \in \Omega \subset R^m$. Для синтеза модели изменения исследуемого процесса требуется найти те стохастические характеристики, к которым относятся коэффициенты сноса $a(x, \omega, t)$ и диффузии $b(x, \omega, t)$ [14, 18].

На основе решения эволюционных уравнений сразу для всех $\omega \in \Omega \subset R^m$, то есть в параметрическом виде, осуществляются оценки следующих характеристик: времени выхода параметра, характеризующего функционирование объекта, за пределы допуска; вероятности работоспособного состояния объекта в заданный момент времени (параметрической надежности); границ допусков на параметры; вероятности превышения интенсивности воздействия на объект над его устойчивостью к воздействиям.

Для гарантированной оценки названных характеристик необходимо обеспечить высокую точность решения уравнений эволюции, которая может быть задана заранее. На основе синтезированной модели может быть построена система прогнозирующего контроля. Поскольку такая система должна обеспечивать выработку рекомендаций по дальнейшей эксплуатации СТО, необходимо придание ей функций ИЭС [9, 20].

Модель задачи оценивания состояния объекта. Пусть вектор технического состояния $x(t) \in R^r$ некоторого СТО описывается стохастическим дифференциальным уравнением

$$\frac{dx(t)}{dt} = f_n(x, t) + g_n(x, t)n_\phi(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где $f_n(x, t) \in R^r$, $g_n(x, t) \in R^r \times R^r$ – детерминированные функции своих аргументов, обеспечивающие выполнение условия Липшица

$$|f_n(x_2, t) - f_n(x_1, t)| + |g_n(x_2, t) - g_n(x_1, t)| \leq L|x_2 - x_1|, \quad L > 0, \quad (2)$$

где $n_\phi(t) \in R^r$ – нормальный белый гауссовский шум с известными статистическими характеристиками:

$M[n_\phi(t)] = 0$, $M[n_\phi(t_1)n_\phi^T(t_2)] = \frac{N_\phi}{2} \delta(t_2 - t_1)$, $M[\cdot]$ – символ математического ожидания, $\delta(\cdot)$ – δ – функция, N_ϕ – спектральная плотность шума [3, 5, 18].

Если в качестве «отказа» объекта принять выход хотя бы одного параметра $x_i(t)$, $i \in \overline{1, r}$, за границу допустимой также одномерной области $G_{D,i} \subset R^1$, то вероятностью безотказной работы СТО объекта будет вероятность $U(x, s)$ «невыхода» процесса из этой области:

$$U(x, s) \equiv P\{x(t) \in G_D, \forall t \in [s, T] | x(s) \in G_D\}, \quad G_D \subset R^r, \quad (3)$$

где $U(x, s)$ – вероятность того, что ордината X процесса $x(t)$ ни разу не выйдет за границы допустимой области $G_D = G_{D,1} \times G_{D,2} \times \dots \times G_{D,r}$ на интервале $[s, T]$ при условии, что в начальный момент времени она находилась в границах допустимой области G_D [13, 15].

Для скалярного случая (когда $r = 1$) вероятность $U(x, s)$ при начальном условии $U(x, T) = 1$ удовлетворяет дифференциальному уравнению в частных производных

$$-\frac{\partial U(x, s)}{\partial s} = a(x, s)\frac{\partial U(x, s)}{\partial x} + \frac{1}{2}b(x, s)\frac{\partial^2 U(x, s)}{\partial x^2}. \quad (4)$$

После замены переменных $t = T - s$, получим:

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = a(x, t)\frac{\partial U(x, t)}{\partial x} + \frac{1}{2}b(x, t)\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2}, \quad U(x, t_0) = 1. \quad (5)$$

Очевидно, что прямому (второму) уравнению Фоккера – Планка – Колмогорова удовлетворяет плотность вероятности $p(x, t)$:

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [a(x, t)p(x, t)] + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2} [b(x, t)p(x, t)], \quad p(x, t_0) = p_0(x). \quad (6)$$

Таким образом, при определении граничных условий, исходя из конкретной ситуации, характеристики СТО в момент достижения границ допустимой области параметров могут быть получены из соотношений (4–6). Эти границы определяются требованиями ГОСТов, технических условий, других нормативных документов или системой вышестоящего уровня. При этом сами границы могут изменяться в зависимости от условий и целей функционирования СТО.

Подчеркнем, что в рассматриваемых постановках задач эти границы считаются «четкими», т.е. они в конкретный момент времени могут быть либо нарушенными, либо нет. Однако потенциально возможен анализ и более общих задач с введением в рассмотрение области предаварийных значений параметров». При этом попадание характеристик системы в такие области может рассматриваться как фактор, влияющий на прогнозы вероятности отказов СТО в будущий период времени [1, 7, 9].

В реальных условиях возникает необходимость решения уравнений (4–6) в случае зависимости исследуемого процесса от параметров $\omega \in \Omega \subset R^m$. К числу таких параметров относятся, например, константы, которые фигурируют в начальных и граничных условиях, свойства внешней среды, реальные условия функционирования объекта, мгновенные воздействия и т.п. К ним относятся также константы, от которых зависят коэффициенты сноса и диффузии исследуемых диффузионных уравнений. Тогда на основании (3) получим:

$$U(x, \omega, s) \equiv P\{x(\omega, t) \in G_D, \forall t \in [s, T] | x(\omega, s) \in G_D\}. \quad (7)$$

Уравнения (4–6) в этом случае примут такой вид:

$$-\frac{\partial U(x, \omega, s)}{\partial s} = a(x, \omega, s) \frac{\partial U(x, \omega, s)}{\partial x} + \frac{1}{2} b(x, \omega, s) \frac{\partial^2 U(x, \omega, s)}{\partial x^2}, \quad U(x, \omega, T) = 1, \quad (8)$$

$$\frac{\partial U(x, \omega, t)}{\partial t} = a(x, \omega, t) \frac{\partial U(x, \omega, t)}{\partial x} + \frac{1}{2} b(x, \omega, t) \frac{\partial^2 U(x, \omega, t)}{\partial x^2}, \quad U(x, \omega, t_0) = 1, \quad (9)$$

$$\frac{\partial p(x, \omega, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [a(x, \omega, t) p(x, \omega, t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [b(x, \omega, t) p(x, \omega, t)], \quad p(x, \omega, t_0) = p_0(x, \omega). \quad (10)$$

Поскольку плотность вероятности является обобщенной характеристикой стохастического процесса, то на ее основе вычисляются все остальные названные выше эксплуатационные характеристики сразу в параметрическом виде.

Оценивание технического состояния на базе эволюционных уравнений. Рассмотрим в некотором нормированном пространстве W эволюционное уравнение в частных производных для r -мерного марковского процесса $x(t)$

$$\frac{\partial p(x, \omega, t)}{\partial t} = L_{\omega, t}^{(r)} \{p(x, \omega, t)\}, \quad p(x, \omega, t) \in W, \quad (11)$$

$$x \in X \subset R^r, \quad t \in \tilde{T} \subset R^1,$$

где $L_{\omega, t}^{(r)}$ – оператор уравнения. Он может быть априорным (например, оператор Фоккера – Планка – Колмогорова при прогнозировании состояния автономных систем) или апостериорным (например, оператор Стратоновича для неавтономных систем). Полагаем, что оператор $L_{\omega, t}^{(r)}$ зависит от вещественного векторного параметра ω , принимающего значения из ограниченной выпуклой области $\Omega \subset R^m$.

Искомое решение $p^*(x, \omega, t)$ уравнения (11) для всех $\omega \in \Omega \subset R^m$ подчинено дополнительным условиям вида

$$G_j \left(p^*(x, \omega, t) \right) \Big|_{(x, t) \in S_i} = \varphi_j(S_i), \quad i = \overline{1, L_0}, \quad j = \overline{1, L_1}, \quad (12)$$

где G_j – линейный непрерывный оператор, действующий в W ; S_i – некоторое многообразие в области $X \times \tilde{T}$, число измерений которого меньше $r + 1$; $\varphi_j(S_i)$ – заданная функция, определённая на многообразии S_i [2, 5].

Соотношения (12) определяются, в первую очередь, начальными и граничными условиями, а также условиями функционирования СТО.

Приближенное решение уравнения (11) представим в виде:

$$\tilde{p}(x, \omega, t) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i(\omega) \gamma_i(x, t), \quad \gamma_i(x, t) \in \tilde{W}, \quad (13)$$

где $\{\gamma_i(x, t)\}_{i=1}^{\infty}$ – базисная система линейных функций в нормированном подпространстве $\tilde{W} \subset W$; $\{c_i(\omega)\}_{i=1}^{\infty}$ – неизвестные коэффициенты уравнения (13).

Для определения коэффициентов $c_i(\omega)$, как правило, применяется метод, приводящий к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений:

$$A(\omega)c(\omega) = B(\omega), \quad \omega \in \Omega, \quad (14)$$

где $A(\omega) = [a_{ij}(\omega), i, j = 1, 2, \dots]$ – известная бесконечномерная матрица, $B(\omega) = [b_i(\omega), i = 1, 2, \dots]$ – известный бесконечномерный вектор-столбец, $c(\omega) = [c_i(\omega), i = 1, 2, \dots]$ – бесконечномерный вектор-столбец искомого (неизвестного) коэффициентов.

Таким образом, отыскание решения (13) сводится, по существу, к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений (14). При этом возникает чрезвычайно сложная задача преобразования бесконечной системы в конечную систему уравнений. От корректности решения этой задачи зависит точность решения эволюционного уравнения (11) и, следовательно, итоговая точность оценки состояния СТО. Таким образом, проблема заключается в нахождении решений уравнения (11) при дополнительном условии вида (12) для последующего использования в задачах оценивания состояния СТО. В работах [3, 9, 10] предложен метод решения эволюционных уравнений сразу в параметрическом виде и с априорно заданной точностью с использованием метода Галеркина на основе степенных полиномов и полиномов Лагранжа.

На базе решения уравнения (11) можно оценить следующее: параметрическую надежность СТО в заданные моменты для последующего интервала времени; время достижения границ допустимой области исследуемым параметром; потенциальную опасность нерегламентированного воздействия на объект; величины выбросов значений параметров. Кроме того, можно задать допуски и ограничения на параметры.

Параметрическая надежность определяется по аналогии с (8) при начальном условии $U(x, \omega, T) = 1$ и границах области допустимых значений в виде «поглощающих границ» [14, 18].

Если $p_T(x, \omega, t)$ – плотность вероятности для времени достижения границы допустимой области G_D , то одномерные моменты для времени выхода процесса $x(\omega, t)$ на границы этой области определяются выражением

$$T_n(\omega) = \int_0^{\infty} t^n p_T(x, \omega, t) dt, \quad n = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Если же найдено значение параметрической надежности $U(t, \omega, x)$, то время невыхода характеристик объекта за границы допустимой области определяется путем численного решения:

$$T(\omega) = \int_0^{\infty} U(t, \omega, x) dt. \quad (16)$$

Потенциальная опасность, рассчитанная на основе параметризованной модели «нагрузка – несущая способность», определяется из условия превышения интенсивности возможного воздействия $S_B(\omega, t)$ над устойчивостью к воздействиям $R_B(\omega, t)$ в течение времени \tilde{T} [2]:

$$\Psi_{ПО}(\omega, t) = R_B(\omega, t) - S_B(\omega, t) < 0, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in \tilde{T} \subset R^1. \quad (17)$$

В рамках данной модели вероятность работоспособного состояния (РС) СТО после реального воздействия $S_{PB}(\omega, t)$ рассчитывается аналогично (17):

$$Q_{PC}(\omega, t) = R_B(\omega, t) - S_{PB}(\omega, t) < \theta, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in \tilde{T} \subset R^1.$$

Распределение наибольших абсолютных значений (выбросов) $M_A(x_0, \omega, t)$ процесса $x = x(\omega, t)$ может определяться по формуле:

$$M_A(x_0, \omega, t) = \sup_{t_0 \leq \tau \leq t} |x(\omega, \tau)|, \quad x(\omega, t_0) = x_0(\omega) = x_0. \quad (18)$$

Для назначения допусков и ограничений на параметры, характеризующие состояние СТО, необходимо при заранее заданной вероятности нормального функционирования $P_{H\Phi}(\omega)$ найти решение уравнения

$$P_{H\Phi}(\omega) = p(x \in G_D). \quad (19)$$

Существующие системы контроля СТО не обеспечивают реализацию алгоритмов оперативной оценки текущего состояния и решения уравнений (15–19) для определения стохастических характеристик процесса в будущие моменты времени. Поэтому требуется создание принципиально новой системы контроля состояния СТО, основанной на диффузионных параметрических моделях оценивания. Такая система контроля состояния СТО должна обладать свойствами ИЭС и обеспечивать выполнение следующих функций [8, 14, 17]:

- непрерывную оценку текущего состояния СТО для своевременного обнаружения признаков нештатной эксплуатации (эксплуатации в нештатных условиях);
- высокое быстродействие оценки состояния СТО и оперативность выдачи результатов прогноза в случае угрозы возникновения аварийной ситуации;
- заданную точность оценки состояния СТО в зависимости от области допустимых значений параметра, а также уровня шумов и внешних помех;
- выработку рекомендаций о возможности дальнейшей эксплуатации СТО после ликвидации нештатной ситуации.

Для реализации названных выше функций ИЭС должна содержать следующие функциональные подсистемы:

- подсистему анализа текущего состояния СТО, включающую комплекс средств измерений и логическое звено;
- подсистему синтеза модели объекта в виде эволюционных уравнений, получения их решения в параметрическом виде и хранения полученных опорных решений для последующего использования при получении оперативных оценок состояния объекта,
- некоторую управляющую подсистему для принятия решения о возможности (целесообразности) дальнейшей эксплуатации СТО, выдачи обоснованных рекомендаций оператору или для принятия экстренных мер в случае развития аварийной ситуации.

При нормальных условиях эксплуатации ИЭС обеспечивает оптимальность функционирования СТО в соответствии с его предназначением за счет отмены или снижения объема профилактических работ при нахождении показателей функционирования в границах области допустимых значений. Основным показателем качества функционирования системы в этих условиях является точность.

В нештатных условиях ИЭС, используя конкретное значение параметра $\omega \in \Omega$ и хранящиеся в памяти опорные решения эволюционных уравнений, оперативно осуществляет прогноз основных эксплуатационных показателей объекта; вырабатывает рекомендации по формированию управляющих воздействий; оценивает возможные последствия их реализации. На СТО осуществляется квазиоптимальное управляющее воздействие, синтезированное на основе выбранного решения. Поскольку нештатная ситуация характеризуется дефицитом времени на анализ обстановки и принятие решения, то основным критерием функционирования ИЭС будет ее оперативность.

Заключение. Несмотря на множество имеющихся методов априорного оценивания состояния СТО, они не нашли широкого применения в реальных условиях эксплуатации из-за невысоких точности и оперативности получения результатов. Предложенный параметрический подход к оценке состояния СТО позволит значительно снизить время оценки при сохранении достаточно высокой точности. В нормальных условиях эксплуатации этот метод является основой для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию системы, в нештатных условиях – позволяет повысить уровень готовности объекта к использованию по назначению, безопасность эксплуатации, предотвратить возникновение предпосылок аварий и их усугубления.

Задача оценивания состояния СТО должна рассматриваться в общей параметрической постановке, заключающейся в том, что исследуемые объекты описываются в рамках теории стохастических систем. Решения стохастических эволюционных уравнений, моделирующих данные системы, непрерывно зависят от всех характерных параметров задачи прогнозирования.

Одним из возможных направлений преодоления указанных сложностей могло бы стать оснащение вновь разрабатываемых или модернизируемых сложных объектов специализированными средствами измерений, реализующими метод параметрической оценки локальных характеристик процесса функционирования СТО [8–10]. При реализации необходимых алгоритмов на современных ЭВМ не представляют сложности хранение большого количества информации и трудности вычислений при подборе аппроксимирующих функций при синтезе локальных характеристик эволюционного процесса.

Предложенный метод оперативной оценки состояния СТО может быть положен в основу задания технических требований к системам контроля критически важных и потенциально опасных объектов, предназначенных для обеспечения эффективности функционирования объектов в нештатных условиях и угрозы развития аварийных ситуаций.

Список литературы

1. Абзалов А. В. Методика анализа предаварийных ситуаций на технологических объектах управления / А. В. Абзалов, Р. Р. Жедунов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 4. – С. 50–59 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(24\)/50-59.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(24)/50-59.pdf)).
2. Бункин Н. Ф. Стохастические системы в физике и технике / Н. Ф. Бункин. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2011. – 366 с.
3. Булычев Ю. Г. Моделирование эволюционных систем с использованием опорно-проекционного метода / Ю. Г. Булычев, А. П. Лапсарь // Математическое моделирование. – 1998. – № 1. – С. 20–30.
4. Гардинер К. В. Стохастические методы в естественных науках / К. В. Гардинер. – Москва : Мир, 1977. – 586 с.
5. Гихман И. И. Введение в теорию случайных процессов / И. И. Гихман, А. В. Скороход. – Москва : Наука, 1986. – 527 с.
6. Зеленский А. В. Надежность сложных электронных систем специального назначения : эл. уч. пос. / А. В. Зеленский, В. А. Зеленский. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012.
7. Кляцкин В. И. Очерки по динамике стохастических систем / В. И. Кляцкин. – Москва : Крассанд, 2012. – 448 с.
8. Кочнев С. В. Синтез измерительно-управляющих систем для потенциально опасных сложных технических объектов на базе параметризованных марковских моделей / С. В. Кочнев, А. П. Лапсарь // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 5. – С. 77–85.
9. Лапсарь А. П. Метод оценки состояния сложных технических объектов для синтеза быстродействующих прогнозирующих систем / А. П. Лапсарь // Измерительная техника. – 2004. – № 2. – С. 7–11.
10. Лапсарь А. П. Метод параметрической оценки локальных характеристик диффузионных марковских процессов / А. П. Лапсарь // Измерительная техника. – 2005. – № 12. – С. 15–17.
11. Леваков А. А. Стохастические дифференциальные уравнения / А. А. Леваков. – Минск : БГУ, 2009. – 231 с.
12. Михеев М. Ю. Математические и информационно-структурные модели прогнозирования состояния технически сложных объектов / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин, М. А. Линкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 232–249 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/232-249.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/232-249.pdf)).
13. Оксендаль Б. Стохастические дифференциальные уравнения. Введение в теорию и приложения / Б. Оксендаль. – Москва : Мир, АСТ, 2003. – 408 с.
14. Острейковский В. А. Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ / В. А. Острейковский. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
15. Пугачев В. С. Стохастические дифференциальные системы / В. С. Пугачев, И. Н. Синицын. – Москва : Наука, 2000. – 1000 с.
16. Савочкин А. Е. Алгоритмизация работы системы мониторинга и контроля для решения задач идентификации степени повреждения технически сложных объектов / А. Е. Савочкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2. – С. 23–35 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(26\)/23-35.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(26)/23-35.pdf)).
17. Савочкин А. Е. Применение нейросетевого подхода при проектировании информационно-измерительных систем для определения степени повреждения технически сложных объектов / А. Е. Савочкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 2. – С. 151–160 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(22\)/151-160.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(22)/151-160.pdf)).
18. Тихонов В. И. Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. – Москва : Советское радио, 1977. – 488 с.
19. Учаев Д. Ю. Анализ и управление рисками, связанными с информационным обеспечением человеко-машинных АСУ технологическими процессами в реальном времени / Д. Ю. Учаев, Ю. М. Брумштейн, И. М. Ажмухадеев, О. М. Князева, И. А. Дюдиков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 2. – С. 82–95 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(34\)/82-97.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(34)/82-97.pdf)).
20. Щербань И. В. Измерительно-информационные системы : учеб. пос. / И. В. Щербань. – Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2008. – 80 с.
21. Юрков Н. К. К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 220–231 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/220-231.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/220-231.pdf)).

References

1. Abzalov A. V., Zhedunov R. R. Metodika analiza predavariynykh situatsiy na tekhnologicheskikh obektakh upravleniya [Methodology of analyzing pre-crash situations on process control objects]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2013, no. 4, pp. 50–59 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(24\)/50-59.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(24)/50-59.pdf)).
2. Bunkin N. F. *Stokhasticheskie sistemy v fizike i tekhnike* [Stochastic systems in physics and engineering], Moscow, Bauman MSTU Publ. House, 2011. 366 p.
3. Bulychev Yu. G., Lapsar A. P. Modelirovanie evolyutsionnykh system s ispolzovaniem oporno-proektsionnogo metoda [Modeling of evolutionary systems with use of a basic and projective method]. *Mathematischeskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling], 1998, no. 1, pp. 20–30.
4. Gardiner K. V. *Stokhasticheskie metody v estestvennykh naukakh* [Stochastic methods in the natural sciences], Moscow, Mir Publ., 1977. 586 p.
5. Gikhman I. I., Skorokhod A. V. *Vvedenie v teoriyu sluchaynykh protsessov* [Initiation in the theory of accidental processes], Moscow, Nauka Publ., 1977. 586 p.
6. Zelenskiy A. V., Zelenskiy V. A. *Nadezhnost slozhnykh elektronnykh sistem spetsialnogo naznacheniya* [Reliability of complex electronic systems for special purposes], Samara, Samara State Aerospace University Publ. House, 2012.
7. Klyatskin V. I. *Ocherki po dinamike stokhasticheskikh sistem* [Essays on dynamics of stochastic systems], Moscow, Krassand Publ., 2012. 448 p.

8. Kochnev S. V., Lapsar A. P. Sintez izmeritelno-upravlyayushchikh sistem dlya potentsialno opasnykh slozhnykh tekhnicheskikh obektov na baze parametrizovannykh markovskikh modeley [Synthesis of measuring and control systems for potentially dangerous complex technical objects on the basis of a parameterized Markov models]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Problems of Safety and Emergencies], 2014, no. 5, pp. 77–85.
9. Lapsar A. P. Metod otsenki sostoayniya slozhnykh tekhnicheskikh obektov dlya sinteza bystrodeystvuyushchikh prognoziruyushchikh sistem [The method of estimating the state of complex technical objects for the synthesis of high-prediction systems]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Technics], 2004, no. 2, pp. 7–11.
10. Lapsar A. P. Metod parametricheskoy otsenki lokalnykh kharakteristik diffuzionnykh markovskikh protsessov [Method of parametric estimation of the local characteristics of Markov diffusion processes]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Technics], 2005, no. 12, pp. 15–17.
11. Levakov A. A. *Stokhasticheskie differentsialnye uravneniya* [Stochastic differential equations], Minsk, BGU Publ. House, 2009. 231 p.
12. Mikheev M. Yu., Prokofev O. V., Savochkin A. Ye., Linkova M. A. Matematicheskie i informatsionno-strukturnye modeli prognozirovaniya sostoyaniya tekhnicheskikh slozhnykh obektov [Mathematical and structural models of forecasting of technically complex objects]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 232–249 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/232-249.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/232-249.pdf)).
13. Oksendal B. *Stokhasticheskie differentsialnye uravneniya. Vvedenie v teoriyu i prilozheniya* [Stochastic differential equations. Introduction to the theory and applications], Moscow, Mir, AST Publ., 2003. 408 p.
14. Ostreykovskiy V. A. *Fiziko-statisticheskie modeli nadezhnosti elementov YaEU* [Physical and statistical models of reliability of the NEU elements], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 200 p.
15. Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. *Stokhasticheskie differentsialnye sistemy* [Stochastic differential systems.], Moscow, Nauka Publ., 2000. 1000 p.
16. Savochkin A. Ye. Algoritmizatsiya raboty sistemy monitoringa i kontrolya dlya resheniya zadach identifikatsii stepeni povrezhdeniya tekhnicheskikh slozhnykh obektov [Algorithmization of the system of monitoring for solving tasks of identification of degree of damage to the complex technical objects]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2014, no. 2, pp. 23–35 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(26\)/23-35.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(26)/23-35.pdf)).
17. Savochkin A. Ye. Primenenie neyrosetevogo podkhoda pri proektirovanii informatsionno-izmeritelnykh sistem dlya opredeleniya stepeni povrezhdeniya tekhnicheskikh slozhnykh obektov [A neural network approach when designing information-measuring systems to determine the extent of damage technically complex objects]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2013, no. 2, pp. 151–160 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(22\)/151-160.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(22)/151-160.pdf)).
18. Tikhonov V. I., Mironov M. A. *Markovskie protsessy* [Markov processes], Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 488 p.
19. Uchaev D. Yu., Brumshteyn Yu. M., Azhmukhadodov I. M., Knyazeva O. M., Dyudikov I. A. Analiz i upravlenie riskami, svyazannymi s informatsionnym obespecheniem cheloveko-mashinnykh ASU tekhnologicheskimi protsessami v realnom vremeni [Analysis and management of risks associated with information security man-machine automatic control system of technological processes in real time]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2016, no. 2, pp. 82–95 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(34\)/82-97.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(34)/82-97.pdf)).
20. Shcherban I. V. *Izmeritelno-informatsionnye sistemy* [Measurement and information system], Rostov-on-Don. YUFU Publ. House, 2008. 80 p.
21. Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Petryanin D. L. K probleme modelirovaniya riska otkaza elektronnoy apparatury dlitel'nogo funktsionirovaniya [To the problem of modeling the risk of failure of electronic equipment long life operation]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 220–231 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/220-231.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/220-231.pdf)).