

Уважаемые коллеги!

Вы держите в руках первый номер рецензируемого научно-практического журнала «Надежность и качество сложных систем», учрежденного ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет». Мы надеемся на успешное сотрудничество с вами.

Наш журнал основывается на материалах международного симпозиума «Надежность и качество», который традиционно в течение уже 18 лет проводится Пензенским государственным университетом, кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры», а также на опыте издания межвузовского сборника научных трудов «Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС», в котором публиковались труды по более ограниченной тематике цифрового моделирования, истоки которого впервые в мире были заложены на кафедре КиПРА профессором Е. Н. Маквцовым.

Целью создания настоящего издания является предоставление возможности более регулярного общения ученых, специалистов и руководителей предприятий по актуальным проблемам надежности и качества сложных систем, причем не только технических, но и эргатических, а также экономических.

Целью создания нового журнала является обсуждение фундаментальных и прикладных проблем надежности, безопасности и качества проектирования, производства, эксплуатации и сервисного обслуживания сложных наукоемких технических изделий; разработки и внедрения методов и средств повышения надежности и качества инновационных информационных и коммуникационных технологий в науке и производстве.

Журнал сформирован в соответствии с требованиями ВАК и предназначен, в том числе, и для публикации основных результатов диссертационных исследований докторов и кандидатов наук. Издание журнала «Надежность и качество сложных систем» и его формирование регламентируются основными нормативно-правовыми документами в сфере научной деятельности.

Редакция надеется, что представленные на страницах научно-практического журнала «Надежность и качество сложных систем» материалы найдут заинтересованных читателей и послужат темами для интересных научных дискуссий в последующих номерах.

Ждем ваших статей и желаем авторам успехов и творческих свершений.

В. И. Волчихин

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Северцев Н. А. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ И ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ	4
Абрамов О. В. К ПРОБЛЕМЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	11
Северцев Н. А., Катулев А. Н. МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОНОМНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	17
Юрков Н. К. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	27
Бецков А. В. БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТА	35

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Каптанов В. А. СТРАТЕГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ С КОНЕЧНЫМ МНОЖЕСТВОМ СОСТОЯНИЙ	41
Авакян А. А., Дмитриенко А. Г. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОНИКИ	47
Садыхов Г. С., Савченко В. П. К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ НАРАБОТКИ ДО КРИТИЧЕСКОГО ОТКАЗА ТЕХНОГЕННО-ОПАСНОГО ОБЪЕКТА	54
Дедков В. К. ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОСВЕННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	58

Домкин К. И., Недорезов В. Г.
ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ КЕРМЕТНЫХ РЕЗИСТОРОВ
С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ64

Острейковский В. А.
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА
И ТЕОРИИ КАТАСТРОФ СИНДРОМА ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ.....69

Якимов А. Н.
ПРЕДИКАТНАЯ АЛГЕБРА ВЫБОРА В МОДЕЛИРОВАНИИ
МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ.....78

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Бушмелева К. И., Увайсов С. У.
СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ.....84

Бурлаченко А. В., Писарев В. Н.
К ПРОБЛЕМЕ АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ88

Бростилова Т. Ю., Бростилов С. А., Мурашкина Т. И.
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ93

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 621.642.88:504

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ И ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Н. А. Северцев

В ходе эксплуатации сложной технической системы (СТС) необходимо контролировать ее параметры для определения качества ее функционирования, выполнения своего предназначения, а также безопасности системы. При управлении ТС предполагается, что в каждый момент времени известно, в каком положении находятся все подсистемы (элементы) СТС. Это означает, что все внутренние переменные системы измерения могут быть измерены и представлены в качестве выходных значений параметров, которые определяются при прямых, косвенных, совместных и других видах измерений. Информация, полученная при прямых и совокупных измерениях, как правило, обрабатывается по определенному алгоритму для получения результатов косвенных и совместных измерений. Результаты всех измерений дают информацию о тех или иных свойствах исследуемой СТС (объекта). Соответствие значений параметров нормам, установленным в эксплуатационной документации, означает, что СТС (объект) измерения обладает набором требуемых свойств. В настоящее время часто используется понятие «состояние системы». Это понятие физической системы или физического процесса трудно поддается общему определению из-за большого разнообразия физических систем (объектов): непрерывных и дискретных, статических и динамических, логических и статистических и т.д. Отметим, что в теории измерений, основанной на точных математических методах, состояние системы (объекта) измерения может быть определено в математических терминах. Состояние системы (объекта) измерения может быть представлено в виде элемента s множества S возможных состояний, в котором расстояние между ближайшими подсистемами (элементами) определяется точностью измерений. Множество состояний S можно рассматривать как метрическое пространство состояний системы (объекта), в котором расстояние между двумя соседними элементами (подсистемами), принадлежащими им ($s_1 \in S$ и $s_2 \in S$), определяется с точностью, характеризуемой погрешностью измерения всех координат пространства состояний (параметров системы – объекта измерений).

Расстояние между любыми двумя соседними подсистемами, объектами s, s_1 является действительной функцией $R(s, s_1)$, удовлетворяющей трем аксиомам метрического пространства [1]:

$$\begin{aligned}R(s, s_1) &= 0 \quad \text{при } s = s_1; R(s, s_1) = R(s_1, s); \\R(s_1, s_2) &\leq R(s, s_1) + R(s, s_2),\end{aligned}$$

где s – любая точка; s_1, s_2 – известные точки; R – расстояние между точками. Пространство состояний можно использовать для анализа объектов (систем) измерений, характеризующихся как не-

зависимыми, так и взаимосвязанными между собой параметрами. В первом случае для оценки состояния необходимо вести наблюдение за всеми параметрами состояния. Пространство состояния здесь является евклидовым, а расстояние между двумя соседними точками в нем определяется евклидовой метрикой

$$R(s, s_1) = \sqrt{(s, s_1)}. \quad (1)$$

Во втором случае, когда между параметрами имеются какие-либо зависимости, необходимо учитывать эту взаимосвязь. Если среди них выделить группу независимых параметров, то наблюдение за объектом (системой) измерения можно осуществлять только по ней. Эти параметры мы назовем параметрами наблюдения. Пространство, образуемое ими, назовем пространством наблюдения. При отсутствии взаимосвязи параметры состояния являются и параметрами наблюдения, а пространство состояния совпадает с пространством наблюдения. Пользуясь взаимосвязью, можно выделить несколько групп параметров наблюдения, каждая из которых образует свое пространство наблюдения. В этом случае оно не совпадает с пространством состояния и является его частью. В новых координатах пространства наблюдения расстояние между двумя соседними точками будет определяется уже не евклидовой метрикой, а более сложной метрикой риманова пространства.

Предварительный анализ любой системы (объекта) измерения показывает, что между параметрами, характеризующими состояние системы (объекта), всегда существуют некоторые соотношения, которые выражают в виде математической зависимости реальные физические связи. Примерами таких соотношений являются уравнения сплошности, материального и теплового баланса, зависимости, отражающие состояние газа, пара, законы теплообмена, гидродинамики и т.д. Предположим, что система (объект) измерения в пространстве состояний P характеризуется вектором \hat{p} с координатами p_1, p_2, \dots, p_n и между ними имеет место соотношение [2]

$$f(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0. \quad (2)$$

Множество S всех точек $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, удовлетворяющих уравнению (1), называется гиперповерхностью пространства s . Если функция (2) имеет в области изменения параметров G непрерывные частные производные по переменным p_1, p_2, \dots, p_n , то в каждой точке p области G определен градиент функции f :

$$\text{grad}(f) = \left(\frac{\partial f}{\partial p_1}, \frac{\partial f}{\partial p_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial p_n} \right). \quad (3)$$

Если функция f линейная и хотя бы один из коэффициентов, стоящих перед переменной p_i , отличен от нуля, то гиперповерхность представляет собой плоскость. Пусть имеется h гиперповерхностей s_1, s_2, \dots, s_n , каждая из которых отражает реально существующую физическую связь между координатами p_i . В пространстве состояний p они заданы соответственно уравнениями

$$\left. \begin{aligned} f_1(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \\ f_2(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \\ &\dots \\ f_h(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Пересечение всех этих гиперповерхностей, т.е. множество всех точек $p \in P$, удовлетворяющих одновременно всем уравнениям (4), называется m -мерным многообразием с размерностью ($m = n - h$), которое в пространстве состояния P задается системой $(n - m)$ -уравнений. В частности, при $h = 1$ $(n - 1)$ -мерное многообразие задается одним уравнением и совпадает с гиперповерхностью S .

Будем считать, что ведется наблюдение сложного физического явления, описываемого соотношением (4). Любому состоянию этого физического явления соответствует определенная точ-

ка M многообразия в пространстве состояний P , которая принадлежит всем гиперповерхностям, образующим многообразие. Подчеркнем, что в соответствии с законом или моделью, отражающими это физическое явление, точка M находится не в любой точке пространства P , а только на многообразии. В противном случае закон или модель неверно отражают сущность физического явления.

Анализ уравнений (4) показывает, что для определения точки M в пространстве P нет необходимости в измерении всех его параметров (координат). Уравнения (4) связывают между собой параметры p_1, p_2, \dots, p_n , значение любого из них, например p_n , можно определить через значения остальных параметров p_1, p_2, \dots, p_{n-1} . Следовательно, пространство P , порожаемое координатами p_1, p_2, \dots, p_n , совпадает с подпространством, порожаемым координатами p_1, p_2, \dots, p_{n-1} . Не изменяя пространство P , можно исключить из системы порожающих координат всякий параметр, являющийся комбинацией остальных. Проводя такое исключение последовательно h раз в соответствии с числом уравнений (4), можно добиться того, что из первоначальной системы координат остаются только независимые между собой, соответствующие базис-пространства и порожающие подпространство X размерности $n-h$, которые по существу являются пространством наблюдения. Отсюда следует, что пространство наблюдения отличается от пространства состояния тем, что его образуют только независимые параметры, образующие базис-пространства. Кроме того, благодаря взаимосвязи параметров в пространстве состояния возможно существование нескольких пространств наблюдения.

Реально существующее явление, отражаемое уравнениями (4), не зависит от того, в какой системе координат оно рассматривается, так как в любой системе координат его всегда можно физически истолковать. На практике для контроля технологического процесса можно использовать, как правило, какую-то одну из возможных координатных систем. В этом случае точка M , характеризующая состояние физического явления (процесса) в пространстве P , отображается точкой M^1 в пространстве наблюдения X , которое является подпространством в пространстве состояний P . Тем самым допускается, что для наблюдения физического процесса нет необходимости знать положение точки M , достаточно знания ее образа M^1 . Решение по управлению СТС должно приниматься на основе анализа положения образа M^1 , находящегося в пространстве наблюдения. Рассмотрим m -мерное многообразие, выражаемое уравнениями (4), в n -мерном пространстве состояния P и вычислим дифференциал дуги по кривой, расположенной на многообразии в координатах X_1, \dots, X_m пространства наблюдения X . Он равен

$$dS^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_{ij}(X_1, \dots, X_m) dX_i dX_j. \quad (5)$$

Данное выражение является дифференциальной квадратичной формой и определяет метрику пространства наблюдения. Применим определение риманова пространства. Римановым пространством называется многообразие, в котором задана инвариантная дифференциальная квадратичная форма. Отсюда пространство наблюдения, в котором находится многообразие, является римановым пространством с симметричным тензором G , если соблюдается условие

$$G = \begin{vmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1m} \\ & G_{22} & \dots & G_{2m} \\ & & \dots & \dots \\ & & & G_{mm} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Напишем выражения для компонент G_{ij} метрического тензора G при известных соотношениях (4). Они в общем виде находятся из выражения

$$G_{ij}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \left[\frac{\partial p_1}{\partial X_i} \frac{\partial p_1}{\partial X_j} + \frac{\partial p_2}{\partial X_i} \frac{\partial p_2}{\partial X_j} + \dots + \frac{\partial p_n}{\partial X_i} \frac{\partial p_n}{\partial X_j} \right]. \quad (7)$$

Представим выражения для компонент метрического тензора в координатах X_1, \dots, X_m . Для диагональных элементов тензора (6) они равны [2]

$$\left. \begin{aligned} G_{11} &= \left(\frac{\partial P_1}{\partial X_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_2}{\partial X_1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P_m}{\partial X_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_{m+1}}{\partial X_1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P_n}{\partial X_1} \right)^2 \\ G_{22} &= \left(\frac{\partial P_1}{\partial X_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_2}{\partial X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P_m}{\partial X_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_{m+1}}{\partial X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P_n}{\partial X_2} \right)^2 \\ &\dots \\ G_{mm} &= \left(\frac{\partial P_1}{\partial X_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_2}{\partial X_m} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P_m}{\partial X_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_{m+1}}{\partial X_m} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P_n}{\partial X_m} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для всех остальных элементов они равны

$$\left. \begin{aligned} G_{12} = G_{21} &= \frac{\partial P_1}{\partial X_1} \frac{\partial P_1}{\partial X_2} + \frac{\partial P_2}{\partial X_1} \frac{\partial P_2}{\partial X_2} + \dots + \frac{\partial P_n}{\partial X_1} \frac{\partial P_n}{\partial X_2} \\ G_{23} = G_{32} &= \frac{\partial P_1}{\partial X_2} \frac{\partial P_1}{\partial X_3} + \frac{\partial P_2}{\partial X_2} \frac{\partial P_2}{\partial X_3} + \dots + \frac{\partial P_n}{\partial X_2} \frac{\partial P_n}{\partial X_3} \\ &\dots \\ G_{(m-1)m} = G_{m(m-1)} &= \frac{\partial P_1}{\partial X_{m-1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_m} + \frac{\partial P_2}{\partial X_{m-1}} \frac{\partial P_2}{\partial X_m} + \dots + \frac{\partial P_n}{\partial X_{m-1}} \frac{\partial P_n}{\partial X_m} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В этом случае, если $G_{ik} = 0$ ($i \neq k$), а $G_{ii} = 1$, имеем евклидово пространство. При $G_{ik} = 1$ происходит деформация пространства наблюдения: $G_{ii} > 1$ – сжатие, при $G_{ii} < 1$ – растяжение. Если $G_{ik} \neq 0$ ($i \neq k$), то происходит еще более сложное искажение пространства наблюдения. Следовательно, метрический тензор характеризует структуру риманова пространства. Таким образом, пространство X , в котором проводят наблюдения за состоянием СТС (объекта) измерения, характеризуется матричным тензором, который определяется с помощью уравнений (4) явления (процесс). Зная метрический тензор, можно определить метрику пространства наблюдения X – это метрика риманова пространства.

Проведенный системный анализ пространства состояний и выявления структуры наблюдения позволяет сделать заключение о существовании особых свойств у объекта (СТС) измерения, обусловленных наличием взаимосвязи между параметрами. Они проявляются в том, что благодаря этой взаимосвязи принципиально существует несколько пространств наблюдения, каждое из которых обладает своей метрикой. Они позволяют выделить из всей информации, относящейся к измерениям исследуемой СТС (объекту), именно ту, которая лучше всего характеризует происходящие в системе (объекте) физические процессы, влияющие на безопасность. Свойства объекта измерения, характеризующие информативность параметров, необходимых для целей управления и обслуживания, правомерно называть метрическими свойствами.

С точки зрения ценности информации метрические свойства характеризуют информативность физических величин параметров. Она выражается через целевую ценность, отражающую взаимосвязь системного параметра с внутренними параметрами объекта (СТС) измерения. Для независимых параметров она различна для целей управления и обслуживания. Выбор контролируемых параметров, учитывая метрические свойства, может быть основан на том, что благодаря их взаимосвязи существует несколько базисов для пространства наблюдения, образуемого независимыми параметрами. Учитывая, что каждое пространство наблюдения обладает своим метрическим тензором, можно ожидать, что выделенные группы независимых параметров также являются неравноценными. С учетом метрического свойства объекта измерения целесообразно выделять наилучшую с точки зрения измерения оценки обобщенных или системных параметров объекта (СТС). В различных координатах пространства наблюдения можно определить такую группу параметров непосредственного измерения, в которой погрешность косвенного измерения будет меньше.

Пример 1. Рассмотрим физическое явление, которое характеризуется тремя физическими величинами P_1, P_2, P_3 и двумя линейными уравнениями, их связывающими:

$$P_1 + P_2 + P_3 - 2 = 0, \quad (10)$$

$$2P_1 - P_2 + 3P_3 - 1 = 0. \quad (11)$$

Эти два уравнения определяют линию в трехмерном пространстве, которая в данном случае является многообразием (рис. 1).

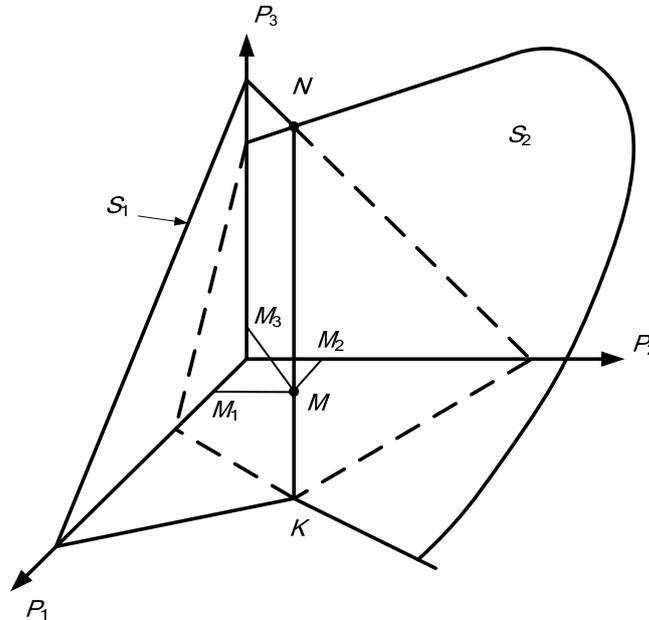


Рис. 1. Наблюдение физического процесса, характеризуемого двумя линейными уравнениями

На рис. 1 изображены трехмерное пространство и две плоскости S_1 и S_2 в нем. Все состояния наблюдаемого физического процесса находятся в положительной области изменения параметров и отображаются точками, лежащими на линии пересечения плоскостей NK . Наблюдать технологический процесс, характеризуемый приведенными уравнениями, и его состояние в точке M можно по одной непосредственно измеряемой величине. Если этой величиной является одна из координат P_1, P_2, P_3 , то любое состояние физического явления в целом, характеризуемое оригиналом в целом точки M , можно наблюдать по одному из его образов M_1, M_2, M_3 , находящихся соответственно на координатах P_1, P_2, P_3 . Подчеркнем, что состояние объекта (СТС) измерения характеризуется точками, лежащими только на прямой NK . Для нахождения расстояния между двумя ближайшими точками воспользуемся выражением (5). На прямой метрический тензор (6) выражается в один компонент G_{11} , который находится по выражению (8). Для этого необходимо, используя исходные уравнения (10) и (11), выразить через наблюдаемую физическую величину, например P_1 , остальные физические величины P_2 и P_3 , взять соответствующие производные и определить значения компонента метрического тензора:

$$P_2 = 1,25 - 0,25P_1;$$

$$P_3 = 0,75 - 0,75P_1;$$

$$G_{11} = 1 + 0,25^2 + 0,75^2 = 1,625.$$

Проведем подобные операции с двумя оставшимися величинами и получим значения компонент метрического тензора для двух других физических величин $G_{22} = 26, G_{33} = 2,44$. Поставляя компоненты метрического тензора в выражение (5), получим дифференциалы расстояния на прямой NK для каждого из рассмотренных случаев:

$$dS^2 = 1,625(dP_1)^2; dS^2 = 26(dP_2)^2; dS^2 = 2,44(dP_3)^2. \quad (12)$$

Дифференциалы (12) определяют метрику пространства наблюдения, которая в данном примере является одна из координат P_1 , P_2 или P_3 . Коэффициенты в этих выражениях характеризуют метрические свойства объекта (СТС) измерения. При одной и той же точности измерения координат минимальное расстояние между бесконечно близкими точками будет определено при наблюдении координаты P_1 , которая является наиболее информативной и обладает наибольшей разрешающей способностью.

Пример 2. Рассмотрим состояние водяного пара.

Водяной пар характеризуется такими параметрами, как температура, давление, энтальпия, энтропия, удельный объем, удельная теплоемкость, теплопроводность и т.д. Эти характеристики являются важными при управлении безопасностью таких СТС, как атомная энергетика, ТЭС, паровые котлы и турбины и пр. Данные параметры связаны между собой известными формулами, предложенными Международной Ассоциацией по свойствам воды и водяного пара, которые позволяют определять значение любого параметра, если известны значения двух других. В настоящее время разработан пакет программ «Water SteamPro», предназначенный для вычисления теплофизических свойств воды и водяного пара в широком диапазоне исходных данных. Найдем значение компонент метрического тензора, характеризующее эти свойства. Для практических целей интерес представляет состояние пара в координатах температуры, давления, энтальпии и энтропии. Энтальпия характеризует эффективность использования пара, а энтропия – потери, связанные с его применением. Для определенности примем, что состояние пара определяется в области со значениями температуры и давления пара, равными соответственно 350 °С и 4 МПа. Сделаем расчет значений компонент метрического тензора в пространстве наблюдения, определяемом температурой и давлением. Для расчета воспользуемся выражениями (8) и (9), результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета состояния водяного пара

Наименование величины	Обозначение	Расчетное значение
Параметры состояния:		
Температура, °С	T	300
Давление, МПа	P	5
Энтальпия, Дж/кг	H	2925,79
Энтропия, Дж/кг	S	6,2114
Параметры наблюдения: Температура, °С		
Частные производные в относительной форме	$\partial ht/\partial th$	0,32
	$\partial st/\partial ts$	0,26
	$\partial hp/\partial ph$	0,0685
	$\partial sp/\partial ps$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Компоненты метрического тензора		
	G_{11}	1,18
	G_{22}	1,004
	G_{12}	2,1

Результаты расчетов показывают, что анализируемые пространства наблюдения водяного пара являются римановым пространством. Об этом свидетельствуют недиагональные метрические тензоры пространства наблюдения. Метрические свойства водяного пара как объекта наблюдения зависят от того, в каком пространстве проводят наблюдения. В табл. 2 приведено пространственное расположение компонент метрического тензора.

Таблица 2

Пространственное расположение компонент метрического тензора

Компоненты метрического тензора	Координаты пространства наблюдения		
	$t-p$	$h-p$	$s-p$
G_{11}	1,16	14,9	17,3
G_{22}	1,004	3,79	1326
G_{12}	2,1	5,24	20,1

Из табл. 2 следует, что в рассматриваемой точке лучшим пространством наблюдения является пространство, определяемое координатами P и t . Сделанный вывод подтверждается практикой измерения параметров пара в СТС СРВ. Отметим, что значения частных производных, а следовательно, и компонент метрического тензора зависят от значений параметров пара. Поэтому метрические свойства пространства наблюдения за состоянием измеряемой субстанции (в частности водяного пара) зависят от точки наблюдения. Для их анализа необходимо провести исследования во всей области изменения параметров, характерной для конкретной практической задачи.

Список литературы

1. Северцев, Н. А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке / Н. А. Северцев. – М. : Высш. шк., 1989. – 431 с.
2. Северцев Н. А. Системный анализ и моделирование безопасности / Н. А. Северцев, В. К. Дедков. – М. : Высш. шк., 2006. – 461 с.

УДК 621.642.88:504

Северцев, Н. А.

Системный анализ определения параметров состояния и параметры наблюдения объекта для обеспечения безопасности / Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 4–10.

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
+7(499)135-55-08

Аннотация. Показано, что состояние системы (объекта) измерения может быть представлено в виде элемента s множества S возможных состояний, в котором расстояние между ближайшими подсистемами (элементами) определяется точностью измерений. Предложено через метрические свойства системы характеризовать информативность физических величин параметров, которая выражается через целевую ценность, отражающую взаимосвязь системного параметра с внутренними параметрами объекта измерения. Осуществлен выбор контролируемых параметров с учетом их метрических свойств. Представлено, что метрические свойства объекта измерения целесообразно определить как некоторую группу параметров непосредственного измерения, в которой погрешность косвенного измерения будет минимизирована.

Ключевые слова: сложная система, системные параметры, измерение, погрешность, информативность.

N. Sevrerchev

Doctor of Technical Science, professor, the managing of the division of safety and nonlinear analysis the establishment of the Russian academy of sciences computer center A. A. Dorodnitsyn,
Russian academy of sciences
119333, Moscow, Vavilova street, 40.
+7(499)135-55-08

Abstract. It is shown that the condition of system (object) of measurement can be presented in the form of an element s of a set of S possible conditions in which the distance between the next subsystems (elements) is defined by the accuracy of measurements. It is offered to characterize informational content of physical quantities of parameters which is expressed through the target value reflecting interrelation of system parameter with internal parameters of object of measurement through metric properties of system. The choice of controlled parameters taking into account their metric properties is carried out. It is presented that it is expedient to define metric properties of object of measurement as some group of parameters of direct measurement in which the error of indirect measurement will be minimized.

Key words: difficult system, system parameters, measurement, error, informational content.

**К ПРОБЛЕМЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ****О. В. Абрамов**

Начало нового столетия отметилось значительным числом чрезвычайных происшествий техногенного характера, аварий и катастроф, приведших к большим материальным потерям и человеческим жертвам. Можно вспомнить отказы техники, приведшие к гибели воздушных и морских судов, аварии в системах электроснабжения, трубопроводах и многое другое. Все это позволило говорить о некотором «синдроме аварий» нового столетия.

В последнее время все явственнее проявляется тенденция роста числа чрезвычайных ситуаций.

Только за 2011 г. потерпели аварию девять самолетов, так что некоторые иностранные компании даже запретили своим сотрудникам пользоваться российскими авиалиниями во время командировок. Кроме этого, потерпел аварию теплоход «Булгария», потеряны три спутника системы ГЛОНАСС, аппарат станции связи «Экспресс-АМ4», грузовой корабль «Прогресс М-12М», космический аппарат «Фобос-Грунт», зафиксирована гибель транспортного рефрижератора «Вест» и плавучей буровой платформы «Кольская».

Переход на рельсы рыночной экономики сопровождался массовым появлением владельцев технических средств, в том числе и достаточно ответственного назначения, для которых основной целью было извлечение максимальной прибыли из того, что досталось им почти даром. Не обремененные знаниями о надежности, законах и способах поддержания работоспособности, расходовании ресурса и др. они сочли, что платить за надежность – неоправданная роскошь. Естественно, что рано или поздно должно было наступить время расплаты.

Причинно-следственный комплекс, определяющий процессы возникновения аварийных ситуаций

В настоящее время оборудование значительного числа сложных технических комплексов, таких как электростанции, крупные предприятия, транспортные средства, трубопроводы и т.п. функционирует за пределами первоначально предназначенного для них срока эксплуатации. Другими словами, они уже выработали свой ресурс. Вместе с тем мнение специалистов по вопросам эксплуатации, надежности и безопасности потенциально опасных и уникальных объектов игнорируется, а зачастую вызывает раздражение у руководства. Техническими вопросами на всех уровнях управления, в том числе в сфере эксплуатации и безопасности, занимаются менеджеры, причем зачастую с сомнительным уровнем квалификации.

Задача обеспечения нормального функционирования сложных технических систем превратилась из инженерно-технической в научно-техническую, так как в процессе их функционирования привносится существенно больший, чем ранее, элемент неопределенности, обусловленный старением оборудования и отсутствием достаточных средств для его замены или ремонта, а также трудностями, связанными со становлением рыночных отношений между владельцами технических средств, организациями, эксплуатирующими технические системы, и предприятиями-изготовителями оборудования.

Для решения задачи снижения риска возникновения аварийных ситуаций необходимо разработать причинно-следственный комплекс, определяющий процессы их возникновения. В определенном смысле этот комплекс представляет собой некоторую модель динамики нежелательных процессов, которые могут привести к аварийным ситуациям. Структурная схема одного из вариантов такого комплекса представлена на рис. 1.

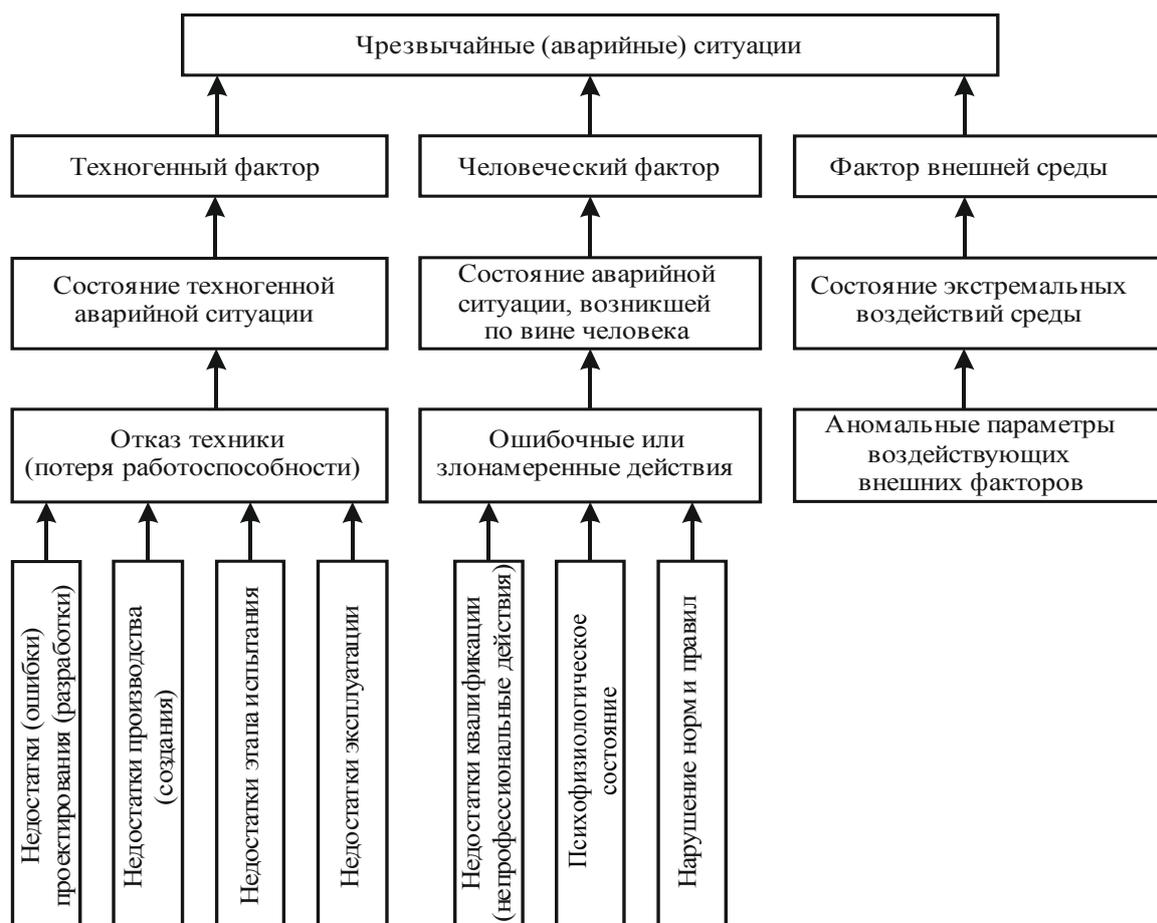


Рис. 1. Причинно-следственный комплекс возникновения аварий эксплуатации технических систем

При исследовании причин возникновения аварийных ситуаций выделяют три основных фактора: техногенный, человеческий и фактор внешней среды.

Говоря о техногенном факторе, прежде всего имеют в виду неудовлетворительное техническое состояние исследуемого объекта, следствием которого становится потеря работоспособности (отказ) техники. Причинами отказа могут стать ошибки, допущенные на этапе проектирования, недостатки выбранной технологии производства и соответствующих средств реализации проектных решений, несовершенство процесса испытаний или ошибки, которые могут быть допущены на этом этапе производства. И, наконец, риск возникновения аварийных ситуаций во многом связан с недостатками процесса эксплуатации.

Важной составляющей процессов эксплуатации является техническое обслуживание, под которым понимают все мероприятия, направленные на сохранение и восстановление работоспособности эксплуатируемых систем. Техническое обслуживание можно разделить на три вида: техническое обслуживание, определяемое отказом; техобслуживание через определенные интервалы времени (обслуживание по наработке); техническое обслуживание по состоянию.

В первом случае оборудование (устройства, системы) без существенных затрат на профилактику и контроль эксплуатируется до отказа. Такую стратегию эксплуатации можно считать целесообразной только в исключительных случаях, когда соответствующее оборудование имеет 100 %-й резерв или является второстепенным для выполнения целевого назначения. При техобслуживании, определяемом отказом, оборудование выходит из-под контроля эксплуатационников. Каждый отказ происходит неожиданно. Это затрудняет оперативное планирование или делает его просто невозможным.

Всегда считалось, что этот вид техобслуживания допустим лишь для объектов, не выполняющих ответственные функции, например, для устройств бытовой техники.

К сожалению, простота и дешевизна такой стратегии обслуживания привели в последнее время к ее довольно широкому распространению и в случае объектов ответственного назначения, таких, например, как судовое оборудование, системы электроснабжения, трубопроводы и др.

Техническое обслуживание, проводимое через определенные интервалы времени (техобслуживание по наработке), до последнего времени является наиболее распространенным в мировой практике. В соответствии с определенным планом система (устройство) по истечении определенного срока, установленного на основе практического опыта, выводится из эксплуатации, проходит контроль, разбирается, выработавшие ресурс узлы или агрегаты заменяются.

Привлекательность такой стратегии эксплуатации определяется прежде всего простотой планирования мероприятий по техническому обслуживанию, а также тем, что в процессе работы системы не надо контролировать и измерять какие-то ее параметры. Она достаточно подробно разработана теоретически, но так как режимы обслуживания назначаются для однотипных и технических средств по априорной информации об их эксплуатационной надежности без учета их реального технического состояния, то это направление связано с большими временными и экономическими потерями.

Стратегия, ориентированная на время эксплуатации, часто оказывается весьма дорогой и далеко не самой оптимальной. Это объясняется тем, что мероприятия по техническому обслуживанию (остановка, разборка, замена, сборка, проверка) проводятся нередко либо преждевременно, либо – слишком поздно.

Стратегия планирования эксплуатации технических систем в зависимости от их фактического состояния привлекает в последнее время все большее внимание специалистов. Такую стратегию называют еще индивидуальной, поскольку она ориентирована на реальное состояние и учитывает особенности данной конкретной системы, а не опыт эксплуатации аналогичных систем и статистические данные, для корректного использования которых необходимы статистическая однородность и существенный объем используемой информации.

Эффект от перехода к индивидуальному принципу назначения моментов технического обслуживания определяется главным образом следующими факторами:

- а) возможностью в наибольшей степени использовать ресурс каждого отдельного объекта, что достигается уменьшением числа преждевременных вмешательств в его работу;
- б) возможностью предотвращения отказов, что обеспечивается своевременным проведением профилактических (предупредительных) мероприятий.

Индивидуальное планирование эксплуатации возможно при условии получения текущей информации о действительном состоянии каждого объекта, т.е. реализация индивидуальной стратегии эксплуатации требует непрерывного или дискретного контроля и анализа состояния объекта. Предполагается, что реальное техническое состояние объекта можно оценить по результатам контроля (измерения) его параметров, а прогнозирование их изменений позволяет эксплуатировать объект до появления признаков опасного снижения надежности, исключив при этом преждевременные демонтажи узлов и агрегатов, а также выполнение других трудоемких работ, имеющих зачастую сомнительную полезность для надежности функционирования.

Прогностическая значимость уровня надежности

Прогнозирование состояния и надежности играет важную роль при индивидуальном планировании эксплуатации. Умение предсказать возможный момент отказа особенно важно для объектов ответственного назначения, потеря работоспособности которых связана с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. Предотвращение отказов является для таких объектов первостепенной задачей.

Основные трудности при решении задачи прогнозирования для синтеза стратегии эксплуатации по состоянию связаны с тем, что прогноз приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов контроля) и в присутствии помех (ошибок контроля), статистические свойства которых достоверно не известны. В этих условиях классические методы математической статистики и теории случайных процессов теряют свои привлекательные свойства, а их использование для прогнозирования приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза. Некоторые пути преодоления отмеченных трудностей и рекомендации по выбору оптимальной стратегии эксплуатации, гарантирующей снижение техногенного риска, приведены в работах [1, 2].

Потеря работоспособности (отказ) техники не всегда приводит к аварийной ситуации. Часто последствия отказа зависят от того, при каком состоянии внешней среды он произошел. Так, от-

каз главного двигателя судна, в результате чего судно теряет ход и управляемость, не приводит к аварийной (чрезвычайной) ситуации, если он происходит в условиях спокойного состояния водной поверхности, при умеренном ветре и при отсутствии препятствий (рифов, отмелей и др.). В этом случае можно попытаться восстановить работоспособность собственными силами или обратиться за помощью к специальным спасательным средствам или проходящим судам. Такие происшествия зачастую даже не фиксируются, что существенно искажает реальную картину состояния надежности и аварийности судового оборудования, а также качества его технического обслуживания.

В условиях шторма отказ главного двигателя приводит обычно к аварийной (чрезвычайной) ситуации. Потеря хода и управляемости может вызвать столкновение судна с препятствиями, потерю остойчивости и, как следствие, гибель судна и тех, кто на нем находится.

Анализ чрезвычайных происшествий, связанных с эксплуатацией морских судов, позволяет утверждать, что подавляющее большинство из них происходит не по причине злонамеренности природы (экстремальных непрогнозируемых воздействий внешней среды), а вследствие неудовлетворительного технического состояния судна его систем и механизмов или несоблюдения предписанных директивными документами правил эксплуатации плавсредств. Достаточно свежим примером этого может служить гибель в Охотском море буровой платформы «Кольская», которая вопреки существующим нормам и требованиям буксировалась в штормовых условиях. Кроме того, ее техническое состояние, по имеющимся данным, вызывало множество вопросов.

Аналогичная картина открывается и при анализе авиапроисшествий. Причиной чрезвычайных ситуаций на воздушном транспорте чаще всего становятся отказы техники и «человеческий фактор». Погодные условия (воздействия внешней среды) хоть и фигурируют нередко в материалах расследований, но в качестве единственной причины чрезвычайной ситуации называются крайне редко.

Термин *человеческий фактор* в последнее время все чаще используется при объяснении причин аварийной ситуации, возникшей по вине человека. Это многозначный термин, описывающий возможность принятия человеком ошибочных или алогичных решений в конкретных нормальных или критических ситуациях [3, 4, 5].

В процессе разработки человеко-машинных систем необходимо предусмотреть, не допустить или уменьшить последствия такого поведения человека. Любому человеку свойственны некоторые ограничения его возможностей или ошибки. Не всегда психологические и психофизиологические характеристики человека соответствуют уровню сложности решаемых задач или проблем. Принято считать, что ошибки, называемые проявлением человеческого фактора, как правило, непреднамеренны: человек выполняет ошибочные действия, расценивая их как верные или наиболее подходящие.

Причины, способствующие ошибочным действиям человека, можно объединить в несколько групп: недостатки информационного обеспечения, отсутствие учета человеческого фактора; ошибки, вызванные внешними факторами; ошибки, вызванные физическим и психологическим состоянием человека; ограниченность ресурсов поддержки и исполнения принятого решения.

Отсутствие полной уверенности в успешности выполнения предстоящего действия, сомнения в возможности достижения цели деятельности порождают *эмоциональную напряженность*, которая проявляется как чрезмерное волнение, интенсивное переживание человеком процесса деятельности и ожидаемых результатов. *Эмоциональная напряженность* ведет к ухудшению организации деятельности, перевозбуждению или общей заторможенности и скованности в поведении, возрастанию вероятности ошибочных действий. Степень *эмоциональной напряженности* зависит от оценки человеком своей готовности к действиям в данных обстоятельствах и ответственности за их результаты. Появлению напряженности способствуют такие индивидуальные особенности человека, как излишняя впечатлительность, чрезмерная старательность, недостаточная общая выносливость, импульсивность в поведении.

Источником ошибок может служить снижение внимания в привычной и спокойной обстановке. В такой ситуации человек расслабляется и не ожидает возникновения какого-либо осложнения. При монотонной работе иногда появляются ошибки, которые практически никогда не встречаются в напряженных ситуациях.

Ошибки в выполнении тех или иных действий могут быть связаны с *неудовлетворительным психическим состоянием* человека. При таком состоянии у человека может быть подавленное

настроение, повышенная раздражительность, замедленность реакций, а иногда, наоборот, излишнее волнение, суетливость, ненужная говорливость. У человека рассеивается внимание, возникают ошибки при выполнении необходимых действий, в особенности при неожиданных отказах оборудования или внезапных изменениях ситуации. Причинами, способствующими появлению такого состояния, могут быть переживание какого-либо неприятного события, утомление, начинающееся заболевание, а также неуверенность в своих силах или недостаточная подготовленность к данному сложному или новому виду деятельности.

Причиной появления ошибок человека могут быть отсутствие или недостаточность *информационной поддержки* (специальные обработчики таких ситуаций в программном обеспечении, наглядные материалы и инструкции); особенно остро эта проблема проявляется в экстремальных ситуациях и в условиях дефицита времени на принятие решения. Во многих случаях человек-оператор представляет собой не просто «человеческое звено» в составе системы, а является главным ее компонентом, во многом определяющим качество функционирования, а также безопасность и надежность человеко-машинных систем в целом. Развитие современных информационных технологий, программного обеспечения и технологий виртуальной реальности позволяет изменить схему традиционного взаимодействия человека-оператора и технической системы. Очевидно, что это позволяет упростить труд современного оператора, повысить его надежность и производительность.

Эффективным средством снижения риска чрезвычайных ситуаций человеко-машинных систем являются современные тренажерные технологии с использованием средств виртуальной реальности. Использование виртуальных моделей позволяет значительно интенсифицировать процесс обучения и исключает возможность развития аварийных ситуаций.

В то же время анализ аварий и катастроф последнего времени заставляет обратить внимание на некоторые нетрадиционные особенности влияния человеческого фактора.

Прежде всего настораживает тот факт, что во многих случаях аварийные ситуации возникают в связи с такими слабо формализуемыми субъективными чертами человеческого фактора, как жажда наживы (стремление любыми путями извлечь максимальную прибыль) и некомпетентность владельцев технических средств и систем. Следствием этого становится эксплуатация технических средств, выработавших свой ресурс или не прошедших необходимого технического обслуживания. Примером могут служить авария на Саяно-Шушенской ГЭС, гибель теплохода «Булгария» и буровой платформы «Кольская». В первом случае необходимая остановка и ремонт агрегатов ГЭС привели бы к уменьшению продажи электроэнергии, что не мог себе позволить менеджмент компании Росгидро; необходимый ремонт т/х «Булгария» не был проведен, ибо судовладелец не хотел упустить прибыль от перевозки туристов (поджимали сроки начала навигации); буксировка в штормовых условиях буровой платформы была вызвана нежеланием компании-судовладельца «Арктикморнефтегазразведка» потерять прибыль из-за несвоевременного начала запланированных работ по контракту во Вьетнаме.

Во всех этих и многих других случаях документация, подтверждающая удовлетворительное техническое состояние и возможность эксплуатации, была у владельцев технических средств в полном порядке. С учетом того, что существует система освидетельствования и сертификации, такие солидные проверяющие организации, как Российский речной регистр, Российский морской регистр судоходства и др., остается только предполагать существование такого важного, но не учитываемого в теории надежности эргатических систем человеческого фактора, как жадность. Этот фактор порождает действия, которые можно отнести и к непрофессиональным и к злонамеренным.

Эксплуатация объектов ответственного назначения, выработавших свой ресурс, эксплуатация до полной потери работоспособности, замена капитального ремонта косметическим, что сплошь и рядом происходит на судах речного и морского флота, – это непрофессионально. Получение документов, разрешающих в этих условиях эксплуатацию, создание условий, при которых человек-оператор (капитан, пилот) вынужден осуществлять выполнение своих функций, – это уже злонамеренные и, следовательно, преступные действия.

Заключение

Таким образом, в этой работе рассмотрены некоторые подходы к решению задачи предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения. Для решения проблемы сни-

жения риска возникновения аварийных ситуаций предложен причинно-следственный комплекс, определяющий процессы их возникновения. В определенном смысле этот комплекс представляет собой некоторую модель динамики нежелательных процессов, которые могут привести к аварийным ситуациям.

Список литературы

1. Абрамов, О. В. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения / О. В. Абрамов, А. Н. Розенбаум. – Владивосток : Дальнаука, 2000.
2. Абрамов, О. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 4–15.
3. Губинский, А. И. Эргономическое проектирование судовых систем управления / А. И. Губинский, В. Г. Евграфов. – Л. : Судостроение, 1977.
4. Губинский, А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / А. И. Губинский. – Л. : Наука, 1982.
5. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество – 2011 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 104–106.

УДК 65.012.122; 519.21

Абрамов, О. В.

К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 11–16.

Абрамов Олег Васильевич

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела надежности и качества,
Учреждение Российской академии наук,
Институт автоматизи-
и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.
E-mail: abramov@iacp.dvi.ru

Аннотация. Рассмотрены некоторые подходы к решению задачи предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения. Для решения проблемы снижения риска возникновения аварийных ситуаций предложен причинно-следственный комплекс, определяющий процессы их возникновения. В определенном смысле этот комплекс представляет собой некоторую модель динамики нежелательных процессов, которые могут привести к аварийным ситуациям.

Ключевые слова: несчастный случай; неудача; надежность; риск; чрезвычайная ситуация; человеческий фактор; прогноз; управление.

O. Abramov

Doctor of Technical Science, professor, the division
head of reliability and quality,
The establishment of the Russian academy of sciences
«The institute of automation and control processes DVO
Russian Academy of Science»
690041, Vladivostok, Radio street, 5.
E-mail: abramov@iacp.dvi.ru

Abstract. Some approaches to the decision of a problem of accident precaution of technical objects of responsible appointment are considered. For the decision of a problem of decrease in risk of occurrence of emergencies the cause and effect complex defining processes of their occurrence is offered. In a sense this complex represents some model of dynamics of undesirable processes which can lead to emergencies.

Key words: accident; failure; reliability; risk; an emergency situation; the human factor; forecasting; management.

МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОНОМНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. А. Северцев, А. Н. Кагулев

Введение

При создании новых динамических систем различного назначения и эксплуатации существующих важное значение имеет проблема обеспечения безопасности их функционирования. Ниже рассматриваются только нелинейные автономные динамические системы, однако излагаемый метод распространяется и на линейные, поскольку они представляют частный случай нелинейных систем.

Из практики известно, что нарушение безопасности функционирования эксплуатируемых систем непосредственно связано с изменением их параметров (из-за возникновения нештатных внешних или внутренних воздействий на системы) и оно может приводить к аварийным или катастрофическим последствиям.

В научном плане нарушение безопасности системы связано с переходом ее из состояния структурной устойчивости в состояние структурной неустойчивости.

Как известно [1, 2], структурная устойчивость определяется совокупностью собственных значений функциональной матрицы Якоби для правой части системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{x}(t) = f(x(t)), \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор фазовых координат из R^n , $f: R^n \rightarrow R^n$, $f \in C^\infty(R^n)$ – вещественная гладкая удовлетворяющая условию Липшица вектор-функция, зависящая как от фазовых координат, так и от параметров собственно динамической системы; уравнения (1) описывают динамику функционирования любой и в общем случае нелинейной многопараметрической динамической системы; собственные значения матрицы Якоби – функции от параметров системы, матрица не вырождена во всей области значений фазовых координат, параметров системы.

Эти утверждения являются непосредственным следствием теоремы Андронова–Понтрягина: *дифференциальное уравнение структурно устойчиво в том и только том случае, если его особенности гиперболические, замкнутые траектории гиперболические, ни одна из траекторий не соединяет седловые точки.*

Определение. Особенность $x^r(t)$ гиперболическая, если она принадлежит области определения системы (1), $f(x^r(t)) = 0$ и функциональная матрица Якоби $(\partial f / \partial x)$ в точке x^r имеет k собственных значений с положительной действительной частью и $n - k$ собственных значений с отрицательной действительной частью, $0 < k < n$.

Из этого определения следуют **условие и показатель** структурной неустойчивости динамической системы: система структурно неустойчива, если хотя бы одно из собственных значений матрицы Якоби обращается в нуль.

При этом особенность становится точкой бифуркации – катастрофы. Множество точек бифуркации считаем конечным, количеством особенностей определяем степень структурной неустойчивости.

Таким образом, структурную устойчивость (и неустойчивость) или безопасность функционирования динамической системы непосредственно можно установить на основе выявления особых, критических точек (бифуркаций или особенностей, или катастроф) решений, описывающих ее динамику дифференциальных уравнений (1), или на основе анализа влияния малых в смысле C^1 -метрики изменений параметров системы на характер (гладкий, непрерывный, скачкообразный) ее перехода из одного состояния равновесия в другое, в том числе из состояния равновесия,

соответствующего штатному режиму функционирования, в недопустимое – нештатное, небезопасное аварийное состояние.

Цель статьи – разработка метода и алгоритма увода нелинейной автономной динамической системы, описываемой нелинейным векторным дифференциальным уравнением с обыкновенными производными или интегральными и дифференциальными уравнениями с частными производными, сводимыми к дифференциальным уравнениям с обыкновенными производными, от критических точек (бифуркаций), однозначно обуславливающих переход системы из штатного режима функционирования в небезопасный нештатный режим.

Здесь следует заметить, что описание динамики функционирования системы в виде (1) охватывает и класс динамических систем, описываемых интегральными уравнениями Вольтерра 2-го рода, и класс систем с распределенными параметрами, описываемых дифференциальными уравнениями с частными производными, так как такие уравнения сводимы к обыкновенным дифференциальным, в общем случае нелинейным вида (1), уравнениям с применением соответственно операции дифференцирования и операции преобразования Фурье–Лапласа с последующим применением теоремы Планшереля [3].

Простыми стандартными методами исследования названных критических точек являются методы, основанные на функциях Ляпунова, фазовых портретах, потенциальных функциях и на разложениях силовых функций в ряд Тейлора в окрестности стационарного решения с последующим выводом потенциальной функции («обобщенной») и канонической формы катастрофы из их конечного числа стандартных типов [4] и/или с последующим интегрированием получаемых уравнений.

Однако методы, использующие потенциальные функции, применимы для градиентных динамических систем, а последние составляют частный класс динамических систем, в том числе и автономных; для построения функций Ляпунова не имеется общего алгоритма; исследование критических точек с помощью фазовых портретов на практике возможно лишь для динамических систем второго порядка; известная теорема Тома–Зимана [4] теории катастроф доказана и применима только для систем, динамика которых описывается потенциалом.

Поэтому существует актуальная проблема оценки структурной устойчивости нелинейных автономных динамических систем, а значит, и показателей безопасности их функционирования, без применения функций Ляпунова, потенциальных функций, фазовых портретов и без замены силовых функций отрезком ряда Тейлора. По результатам оценки должно быть выработано оптимальное решение (управление) по поддержанию системы в состоянии безопасного функционирования.

Метод увода нелинейной автономной динамической системы от критических точек (бифуркаций)

В основу метода принимаются следующие известные фундаментальные факты [5, 6]:

1. Исходной нелинейной автономной динамической системе уравнений (1) однозначно соответствует линейная сопряженная гамильтонова система

$$\dot{p}_j(t) = - \sum_{i=1}^n p_i(t) (\partial f_i(x(t)) / \partial x_j), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где $(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t))$ – вектор сопряженных фазовых координат из R^{*n} .

2. Для решений основной (1) и сопряженной (2) систем невозможны одновременно асимптотически устойчивые положения равновесия и асимптотически устойчивые предельные циклы в основном R^n и сопряженном R^{*n} фазовых пространствах; динамической устойчивости одной из них однозначно соответствует динамическая неустойчивость другой.

3. Функциональная матрица Якоби сопряженной системы (2) есть взятая с обратным знаком транспонированная функциональная матрица Якоби основной системы (1); собственные значения таких матриц отличаются только знаками – знаки противоположны.

4. К неустойчивым системам неприменимо программное управление, т.е. управление, независимое от текущего состояния системы, на достаточно большом промежутке времени; стабилизация системы возможна лишь с помощью обратной связи по выходу.

5. Наличие обратной связи по выходу есть достаточное условие обеспечения системе устойчивости как динамической по Ляпунову, так и структурной по Андронову–Понтрягину: система (1) будет без точек бифуркации. Управление системой (1) по такой обратной связи не нарушает свойство ее автономности и невырожденности ее функциональной матрицы Якоби. Правая часть системы (1) преобразуется к виду

$$\varphi: R^n \times R^m \times R^k \rightarrow R^n,$$

где R^m – пространство управлений, а R^k – пространство параметров системы.

6. Замкнутости исходной системы по обратной связи однозначно соответствует замкнутость сопряженной (**факт тривиальный**).

Из таких фактов сформулируем вывод в виде следующей теоремы.

Теорема. *Нелинейная автономная динамическая система, описываемая нелинейным обыкновенным векторным дифференциальным уравнением (1), уводима управлением $u(t) \in R^m$ в состояние структурной устойчивости – в безопасное состояние от бифуркаций при введении обратной связи по выходу при условии, что функциональная матрица правой части сопряженной для (1) гамильтоновой системы не вырождена, не положительно определена, непрерывна вместе со своими производными по совокупности фазовых координат вектора $x(t)$ из R^n и параметров $\mu(t) = (\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_k(t))$ из R^k основной системы и что $\varphi: R^n \times R^m \times R^k \rightarrow R^n$, $m \leq k + n$, удовлетворяет условиям роста $\|\varphi(x(t), \mu(t), u(t))\| \rightarrow \infty$ при $\|x(t)\| \rightarrow \infty$.*

Доказательство.

Согласно принципу обратной связи по выходу $x(t)$ разомкнутую исходную нелинейную автономную динамическую систему преобразуем в замкнутую. Последняя будет описываться векторным нелинейным уравнением вида

$$\dot{x}(t) = \varphi(x(t), \mu(t), u(x(t)), \mu(t)),$$

где $u(x(t), \mu(t))$ – вектор входных управляющих воздействий по обратной связи, подлежащий определению в каждый текущий момент времени на основе измерений выхода $x(t)$ и параметров системы $(\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_k(t))$; $\varphi(x(t), \mu(t), u(x(t)), \mu(t))$ – непрерывная функция по совокупности своих аргументов вместе со своими производными, удовлетворяет условию Липшица; $\varphi(x(t), \mu(t), u(x(t)), \mu(t)) \equiv f(x(t))$ при условиях $\mu(t) \equiv 0$ и $u(x(t), \mu(t)) \equiv 0$ для $\forall t$.

При такой функции при любых непрерывных или кусочно-непрерывных физически реализуемых (ограниченных) управляющих воздействиях $u(t) \in R^m$ удовлетворяются условия теоремы существования решения уравнения исходной системы, а если потребуется учет произвольно заданных начальных условий, то обеспечивается и единственность решения.

Очевидно, можно положить

$$\mu(t) = (\mu_1(t) = x_{n+1}(t), \mu_2(t) = x_{n+2}(t), \dots, \mu_k(t) = x_{n+k}(t))$$

и рассматривать систему уравнений

$$\dot{x}_j(t) = \varphi_j(x(t), u(x(t))), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\dot{x}_l(t) = \varphi_l(u(x(t))), \quad l = 1, 2, \dots, k, \quad x(t) \in R^{n+k}.$$

Эта система с обратной связью будет управляема из любого исходного состояния, а значит, и уводима от бифуркации, если она допускает целенаправленное изменение своих координат или, иначе, если выполняются условия непрерывности функций

$$\varphi_j(x(t), u(x(t))), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

вместе со своими производными по фазовым координатам при всех управляющих воздействиях. Таким условиям функции

$$\varphi_j(x(t), u(x(t))), \quad j=1, 2, \dots, n,$$

удовлетворяют в силу существования, а при задании исходных состояний и единственности решения исходного нелинейного уравнения, т.е. в силу существования для исследуемой системы переходной функции, отличной от нуля при всех ограниченных управляющих воздействиях по обратной связи.

Теперь для отыскания управления в зависимости от текущего выхода системы воспользуемся функцией Гамильтона

$$H(p(t), x(t), u(t)) = (p^T(t), \varphi(x(t), u(x(t)))) ,$$

где $p^T(t)$ – вектор-строка размера $n + k$ сопряженных координат гамильтоновой системы, определяющийся из системы

$$\dot{p}(t) = -(p^T(t), \varphi'_x(x(t), u(x(t)))) .$$

В этом векторном уравнении $\varphi'_x(x(t), u(x(t)))$ – функциональная $(n + k) \times (n + k)$ -матрица линейной сопряженной гамильтоновой системы, которая в силу выбора $u(x(t))$ всегда может быть приведена к не положительно определенной с ненулевым непрерывным определителем Якоби. Заметим, что этой матрице Якоби однозначно, как следует из факта 3, соответствует матрица Якоби исходной системы с обратной связью и что сопряженная система замкнута по своему выходу.

Реализуем теперь возможность выбора $u(x(t))$ при требовании: система должна переводиться из одного состояния, как из любого начального, в любое другое заданное состояние, в том числе из непосредственно предшествующего особому – катастрофическому – в допустимое не особое при минимальных затратах энергии. Тогда для сопряженной системы соответствующее управляющее воздействие $u^*(x(t))$ должно определяться по выражению

$$u^*(x(t)) = \arg \max_{u(x(t))} H(p(t), x(t), u(x(t))),$$

а значения параметров системы – компонент вектора

$$\mu(t) = (\mu_1(t) = x_{n+1}(t), \mu_2(t) = x_{n+2}(t), \dots, \mu_k(t) = x_{n+k}(t))$$

по выражению

$$\mu_l^*(t) = x_{n+l}^*(t) = \frac{\partial H(x_j^*(t), x_{n+l}(t), u^*(x_j^*(t), x_{n+l}(t))), j = \overline{1, n}, l = \overline{1, k}}{\partial x_l} = 0, \quad l = \overline{1, k},$$

и при оптимальных $u^*(x(t), x^*(t) = (x_j(t), x_{n+l}^*(t), j = \overline{1, n}, l = \overline{1, k}))$ должно выполняться равенство

$$H(p(t), x^*(t), u^*(x^*(t))) = 0.$$

Управление $u^*(x(t))$, очевидно, приведет к изменению для сопряженной системы характеристического многочлена ее функциональной матрицы и собственных значений. При этом становится возможным обеспечение непрерывного изменения собственных значений и решения гамильтоновой сопряженной системы без бифуркаций.

В результате с учетом того, что функциональная матрица линейной сопряженной системы представляется транспонированной с противоположным знаком относительно матрицы Якоби исходной (основной) нелинейной системы уравнений, а значит, с учетом того, что собственные значения функциональной матрицы линейной сопряженной гамильтоновой системы равны по модулю и противоположны по знаку собственным значениям матрицы Якоби замкнутой исходной нелинейной автономной динамической системы, у решения последней не будет бифуркации; система будет структурно устойчива, ее функционирование безопасно. Что и утверждается теоремой.

Однако вследствие того, что исследуемая система описывается нелинейным векторным дифференциальным уравнением, функции

$$\varphi_j(x(t), u(x(t))), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

априори неизвестны (управление не программное), функция Гамильтона записана по существу в неявной форме, не представляется возможным выполнить ее минимизацию в общем виде и получить аналитические выражения для $p(t), \mu^*(t), u^*(x^*(t))$ и для собственных чисел функциональной матрицы сопряженной системы.

В связи с этим можно воспользоваться только численным анализом на ПЭВМ с помощью систем символьной математики и формировать управляющие воздействия, непосредственно изменяя параметры динамической системы, а значит, изменяя зависящие от них элементы функциональной матрицы и, как следствие, ее собственные значения так, чтобы обеспечивались выполнение равенства

$$H(p(t), x(t), u(x(t))) = 0$$

и положительность собственных значений функциональной матрицы, т.е. чтобы не выполнялись необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости линейной сопряженной гамильтоновой системы или, что то же, чтобы выполнялись при этом условия асимптотической устойчивости основной системы. Одновременно обеспечивается выполнение условия ее структурной устойчивости [8].

Соответствующие оптимальные воздействия на параметры динамической системы могут быть найдены только прямыми методами оптимизации без вычисления производных функции Гамильтона; воспользуемся здесь (в следующем подразделе) известным методом покоординатного спуска с разностной аппроксимацией градиента по изменяемому в циклическом порядке параметрам

$$\mu(t) = (\mu_1(t) = x_{n+1}(t), \mu_2(t) = x_{n+2}(t), \dots, \mu_k(t) = x_{n+k}(t))$$

как фазовым координатам.

Алгоритм

По изложенному методу оценки безопасности нелинейной автономной динамической системы по показателям структурной устойчивости системы алгоритм сводится к выполнению следующей последовательности операций:

- составить сопряженную гамильтонову систему дифференциальных уравнений

$$\dot{p}(t) = -(p^T(t), \varphi'_x(x(t), u(x(t))))$$

по отношению к основной – исходной системе:

$$\dot{x}_j(t) = \varphi_j(x(t), u(x(t))), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\dot{x}_l(t) = \varphi_l(u(x(t))), \quad l = 1, 2, \dots, k, \quad x(t) \in R^{n+k};$$

- составить характеристическое уравнение сопряженной системы

$$(-\lambda)^m + S_1(-\lambda)^{m-1} + S_2(-\lambda)^{m-2} + \dots + S_{m-1}(-\lambda) + S_m = 0,$$

где S_ρ , $\rho = 1, 2, \dots, m$, – сумма главных миноров ρ -го порядка функциональной матрицы сопряженной системы [9]:

$$\left(-\frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} - \lambda \right)_{i=1,2,\dots,m}^{j=1,2,\dots,m} = 0,$$

где $m = n + k$, λ – собственное значение, подлежащее вычислению;

– построить из функциональных коэффициентов характеристического уравнения функциональные главные миноры Гурвица;

– исследовать зависимость собственного значения от параметров основной системы по критериям непрерывности на языке ϵ, δ и выявить признак возникновения бифуркации – катастрофы – на основе анализа динамики собственного значения с установлением изменения его знака и принятия им нулевого значения в любых произвольно выбираемых точках – значениях изменяемых параметров системы;

– проверить выполнение равенства

$$H(p(t), x(t), u(x(t))) = 0;$$

– реализовать при невыполнении этого равенства алгоритм покоординатного спуска решения задачи

$$u^*(x(t)) = \arg \max_{u(x(t))} H(p(t), x(t), u(x(t))),$$

т.е. алгоритм поиска оптимальных значений параметров системы таких, чтобы выполнялось равенство

$$H(p(t), x(t), u^*(x(t))) = 0;$$

– сформировать достаточные условия структурной устойчивости основной системы с установлением параметров ее безопасного состояния – режима функционирования;

– сформировать информационную модель отображения текущего состояния динамической системы, оптимальных значений ее параметров и собственных значений функциональной матрицы сопряженной гамильтоновой системы, при которых исходная нелинейная динамическая система структурно устойчива.

Изложенная последовательность операций составляет алгоритм метода, алгоритм реализуется в системе Maple.

Результаты применения алгоритма

Выявим условия, при которых будет существовать точка бифуркации решения нелинейной автономной системы дифференциальных уравнений, описывающих конкуренцию двух популяций:

$$\dot{x}_1 = x_1(c_1 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2);$$

$$\dot{x}_2 = x_2(c_2 - a_{21}x_1 - a_{22}x_2),$$

где $c_1 > 0, c_2 > 0, a_{11} > 0, a_{12} > 0, a_{21} > 0, a_{22} > 0$.

Под условиями существования точки бифуркации будем понимать соответствующие значения коэффициентов самоограничения роста $a_{11} > 0, a_{22} > 0$. С целью выявления точки бифуркации составим сопряженную гамильтонову систему для исходной системы и выпишем для нее характеристическое уравнение. Последнее имеет вид

$$\lambda^2 + \lambda(c_1 + 2a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + c_2 + a_{21}x_1 + 2a_{22}x_2) + (c_1 + 2a_{11}x_1 + a_{12}x_2)(c_2 + a_{21}x_1 + 2a_{22}x_2) - a_{21}a_{12}x_1x_2 = 0,$$

где λ – собственное значение матрицы правой части сопряженной гамильтоновой системы.

Точке бифуркации должен соответствовать разрыв зависимости функции собственного значения от параметров $c_1, c_2, a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$.

На рис. 1, а, б представлены зависимости $\lambda(a_{11})$ и $\lambda(a_{22})$, построенные на ПЭВМ с использованием системы символьной математики Maple, при фиксированных значениях всех других параметров $c_1, c_2, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ и $c_1, c_2, a_{11}, a_{12}, a_{21}$ соответственно.

Из этих зависимостей непосредственно видно, что собственное значение $\lambda(a_{11})$ и $\lambda(a_{22})$ имеет разрыв типа второго рода и скачкообразное изменение знака при $a_{11} = a_{22}$: решение исходной системы уравнений имеет точку бифуркации при $a_{11} = a_{22}$, конкурирующие популяции

при $a_{11} = a_{22}$, т.е. с одинаковыми коэффициентами саморегуляции роста, не могут сосуществовать в одном месте обитания – имеет место структурная неустойчивость в жизнеспособности двух популяций.

Бифуркации отсутствуют при неодинаковых значениях a_{11} и a_{22} и изменении других параметров исследуемой автономной системы.

После оптимизации управления по обратной связи разрывы зависимости собственного значения $\lambda(a_{11})$ и $\lambda(a_{22})$ от тех же параметров устранены, исходная система стала структурно устойчивой, т.е. жизнедеятельность популяций стала безопасной.

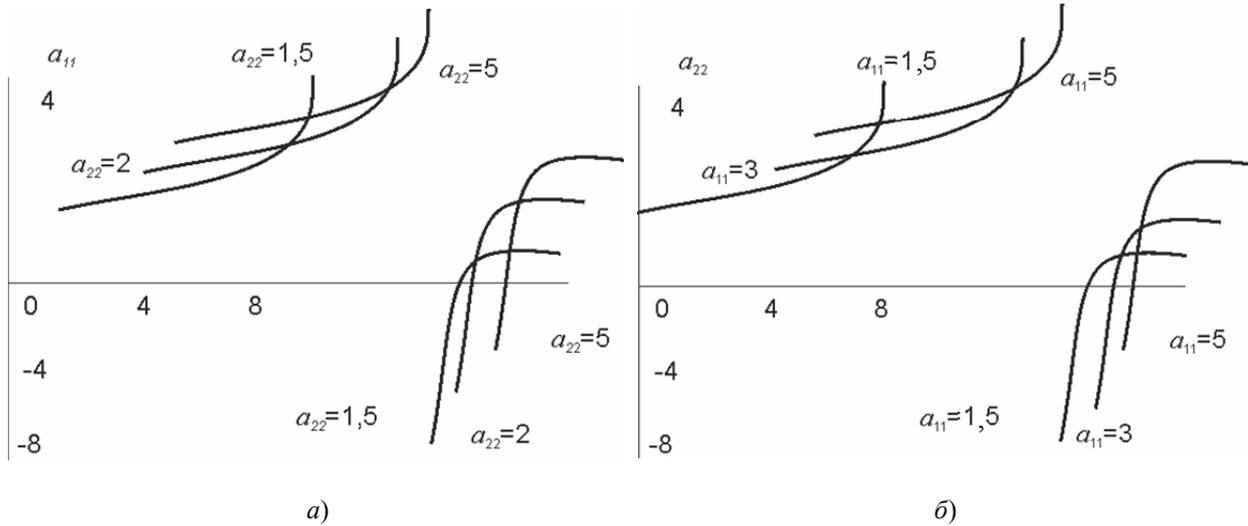


Рис. 1. Зависимость: $a - \lambda(a_{11})$ при $a_{11} = a_{22}$ терпит разрыв 2-го рода;
 $b - \lambda(a_{22})$ при $a_{22} = a_{11}$ терпит разрыв 2-го рода

Отметим, что полученный результат есть математическое обоснование принципа Гаузе: конкурирующие динамические системы – популяции с одинаковыми коэффициентами саморегуляции роста – не могут сосуществовать в одном и том же месте обитания. Вольтерра в [7] доказал этот принцип при сведении исследуемой системы к линейному уравнению первого порядка, разрешенному относительно производной $d(\log x_1 / x_2) / dt$, когда в правых частях одна и та же нелинейность, т.е. в частном случае описания взаимодействия конкурирующих систем; предложенный нами метод свободен от такого рода допущений.

Применим предложенный алгоритм для выявления критических точек решения системы нелинейных аэродинамических уравнений [4], описывающих летательный аппарат:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \sum_j F_i^j C_j + \sum_{j=1}^5 F_i^j x_j; \\ \dot{x}_i &= \sum_j F_i^j C_j + \sum_{j=1}^5 F_i^j x_j + F_i^{km} x_k x_m, \quad k \neq m \neq i, \quad i = 2, 3; \\ \dot{x}_i &= \sum_j F_i^j C_j + \sum_{j=1}^5 F_i^j x_j, \quad i = 4, 5, \end{aligned} \quad (3)$$

где $F_i^j = \partial F_i / \partial x_j$; C_j – управляющие параметры элеронов и рулей летательного аппарата; F_i^j, F_i^{km} – управляющие параметры летательного аппарата.

Построим для (*) сопряженную систему

$$\dot{p}_1 = -[p_1 F_1^1 + p_2 (F_2^{31} + x_3 F_2^1) + p_3 (F_3^{12} x_2 + F_3^1) + p_4 F_4^1 + p_5 F_5^1],$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_2 &= -[p_1 F_1^2 + p_2 F_2^2 + p_3(F_3^{12} x_1 + F_3^2) + p_4 F_4^2 + p_5 F_5^2], \\ \dot{p}_3 &= -[p_1 F_1^3 + p_2(F_2^{31} x_1 + F_2^3) + p_3 F_3^3 + p_4 F_4^3 + p_5 F_5^3], \\ \dot{p}_4 &= -[p_1 F_1^4 + p_2 F_2^4 + p_3 F_3^4 + p_4 F_4^4 + p_5 F_5^4], \\ \dot{p}_5 &= -[p_1 F_1^5 + p_2 F_2^5 + p_3 F_3^5 + p_4 F_4^5 + p_5 F_5^5], \end{aligned}$$

где $p_1 = p_1(t)$, $p_2 = p_2(t)$, $p_3 = p_3(t)$, $p_4 = p_4(t)$, $p_5 = p_5(t)$ – сопряженные координаты.

Для анализа устойчивости системы (3) необходимо исследовать корни характеристического уравнения пятой степени

$$\begin{pmatrix} F_1^1 - \lambda & F_2^{31} + x_3 F_2^2 & F_3^{12} x_2 + F_3^1 & F_4^1 & F_5^1 \\ F_1^2 & F_2^2 - \lambda & F_3^{12} x_1 + F_3^2 & F_4^2 & F_5^2 \\ F_1^3 & F_2^{31} x_1 + F_2^3 & F_3^3 - \lambda & F_4^3 & F_5^3 \\ F_1^4 & F_2^4 & F_3^4 & F_4^4 - \lambda & F_5^4 \\ F_1^5 & F_2^5 & F_3^5 & F_4^5 & F_5^5 - \lambda \end{pmatrix} = 0,$$

где λ – собственное число.

С использованием системы символьной математики Maple определяются множества точек бифуркаций и стационарных точек в зависимости от каждого из управляющих параметров при фиксации всех других (при одновременном изменении всех параметров определение множества бифуркаций невозможно).

Вычислительным экспериментом установлено существование области бифуркаций в связи с изменением управляющих параметров.

На рис. 2 изображена проекция бифуркационного множества системы (3) в пространстве F_1^1, F_2^1 .

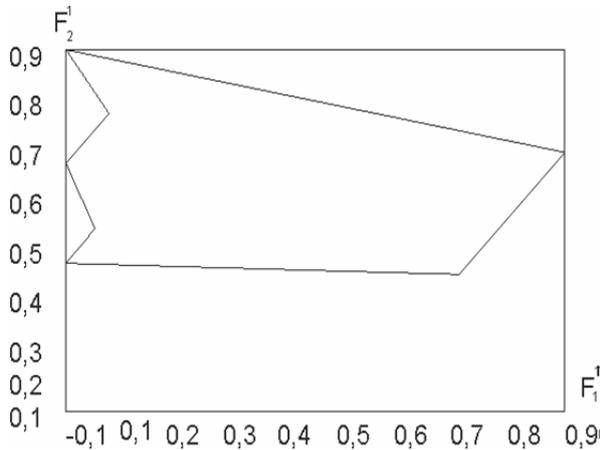


Рис. 2. Проекция бифуркационного множества системы

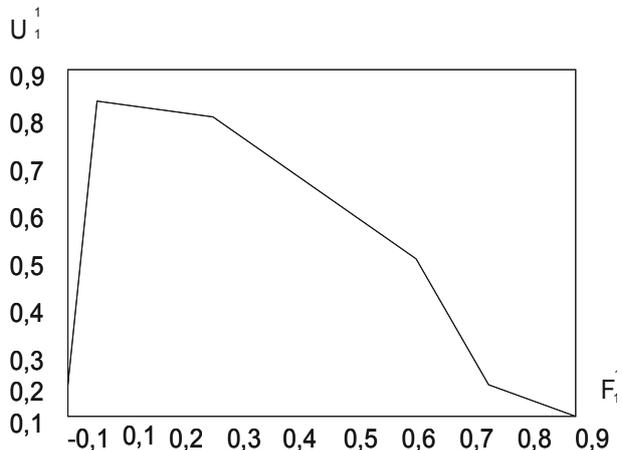


Рис. 3. Функция управления при условии реализации обратной связи по параметру F_1^1

На рис. 3 представлена функция управления при условии реализации обратной связи по параметру F_1^1 , такое управление исключает выход системы в состояние катастрофы – решение системы асимптотически устойчиво, летательный аппарат функционирования остается в режиме устойчивого безопасного функционирования.

Полученные результаты полностью согласуются с результатами [4], где для описания состояний летательного аппарата использовалась обобщенная потенциальная функция. Отсюда сле-

дует и подтверждение достоверности метода. Отметим также, что в предложенном алгоритме не потребовалась потенциальная функция.

Вычислительный эксперимент выполнил А. Ю. Кузнецов, авторы выражают ему свою признательность.

Заключение

Метод распространяется на исследование структурной устойчивости и показателей безопасности функционирования нелинейных динамических систем, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями с частными производными, сводимыми преобразованием Фурье – Лапласа к нелинейным автономным обыкновенным дифференциальным уравнениям, системами нелинейных интегральных уравнений Вольтерра второго рода, когда они могут быть сведены к решению нелинейных автономных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод применим для построения и исследования бифуркационного множества в пространстве параметров автономных нелинейных динамических систем а также для исследования динамической и структурной устойчивости линейных автономных динамических систем.

Список литературы

1. Андронов, А. А. Большие системы / А. А. Андронов, Л. С. Понтрягин // ДАН СССР. – 1937. – Т. 14.
2. Касти, Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Дж. Касти. – М. : Мир, 1982. – 216 с.
3. Колмогоров, А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. – М. : Наука, 1988.
4. Гилмор, Р. Прикладная теория катастроф / Р. Гилмор. – М. : Мир, 1984. – Т. 2 (R. Gilmore. Catastrophe theory for scientists and engineers. A Willey-Interscience Publication, John Wiley and Sons, New-York-Chichester-Brislane-Toronto, 1981).
5. Алексеев, В. М. Оптимальное управление / В. М. Алексеев, В. М. Тихомиров, С. В. Фомин. – М. : Наука, 1979.
6. Первозванский, А. А. Курс теории автоматического управления / А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1986.
7. Вольтерра, В. Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. – М. : Наука, 1976.
8. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество–2011 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 104–108.
9. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Наука, 1966.

УДК 621.642.88:504

Северцев, Н. А.

Метод оценки показателей безопасности автономных динамических систем / Н. А. Северцев, А. Н. Катулев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 17–26.

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
+7 (499) 135-55-08

Катулев Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра математического моделирования,
Тверской государственной университет,
170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.
(4822) 34-24-52

N. Severtcev

Doctor of Technical Science, professor, the managing of
the division of safety and nonlinear analysis the estab-
lishment of the Russian academy of sciences computer
center A. A. Dorodnitsyn,
Russian academy of sciences
119333, Moscow, Vavilova street, 40.
+7 (499) 135-55-08

A. Katulev

Doctor of Technical Science, professor, the professor
of chair of the mathematical simulation,
Tver state university
Russia, 170100, Tver, Zhelyabova street, 33.
(4822) 34-24-52

Аннотация. Изложены принципиальные основы выявления (определения) показателей безопасности функционирования нелинейных автономных динамических систем гамильтонова типа различного назначения. Построены метод и алгоритм их оценки. Приведены результаты исследования показателей безопасности как показателей структурной устойчивости автономных динамических систем, описываемых нелинейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений или нелинейными интегральными уравнениями Вольтерра 2-го рода и нелинейными уравнениями с частными производными, сводимыми к системам обыкновенных дифференциальных уравнений. Установлена достоверность результатов.

Ключевые слова: динамическая система, сложность, устойчивость, метод, дифференциальные уравнения, безопасность.

Abstract. Sets out the policy framework for identifying (defining) safety performance of non-linear autonomous Hamiltonian dynamical systems of various purpose type. Constructed method and algorithm evaluation. The results of investigation of safety indicators as indicators of structural stability of autonomous dynamical systems described by non-linear systems of ordinary differential equations and nonlinear integral equations of first kind 2 Volterra and nonlinear partial differential equations, svodimymi to systems of ordinary differential equations. Is the reliability of the results.

Key words: dynamic system complexity, sustainability, method, differential equations, security.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. К. Юрков

Введение

Системный подход подразумевает всесторонний анализ предметной области. Основными методами системного анализа являются блочно-модульный метод, метод CALS-технологий (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support), метод классификации, метод морфологического анализа, метод функционально-стоимостного анализа и метод структурного анализа и проектирования, методология SADT (Structural Analysis and Design Technique) [1].

Блочно-модульный подход позволяет формировать блочно-модульную структуру рациональных компонентов сложных систем.

При наличии множества информационных технологий возникают трудности по применению типовых структур для полнофункциональной реализации задач принятия решений в программно-технических комплексах. В этих условиях целесообразно последовательно, но в комплексе применять блочно-модульный подход, обеспечивающий реализацию сложных систем по отдельным компонентам.

CALS-технология, реализующая жизненный цикл сложных систем, является той базовой информационной технологией, к которой целесообразно привязывать множество других информационных технологий.

SADT-методология структурного анализа и проектирования позволяет интегрировать процессы моделирования, управления конфигурацией проекта, использования дополнительных языковых средств и руководство всем проектом со своим графическим языком. Процесс моделирования может быть разделен на несколько этапов: опрос экспертов, создание диаграмм и моделей, распространение документации, оценка адекватности моделей и принятие их для дальнейшего использования. Этот процесс хорошо отлажен, потому что при разработке проекта специалисты выполняют конкретные обязанности, а библиотекарь обеспечивает своевременный обмен информацией. Современный уровень информационных технологий предоставляет богатый выбор методов для создания автоматизированной поддержки SADT [2].

Выделение фактов из описания предметной области вида «объект – атрибут – действие» позволяет представлять знания как набор правил, каждое из которых состоит из двух частей: из антецедента и консеквента или условия и результата, или (как в порождающей грамматике) левой и правой частей. Такая концепция позволяет использовать системы продукции [3].

Во всех задачах оценки эффективности систем в иерархической структуре критериев на верхнем (первом) уровне находятся: полезность системы (выходные характеристики, важность, актуальность, перспективность, область применения (критерии второго уровня)); качество функционирования (помехозащищенность, точность, надежность, чувствительность, качество управления); организация системы (совершенство структуры, сложность и т.д.); эволюционная эффективность (осуществимость, ресурсы, возможности модификаций и другие характеристики развития); экономическая эффективность.

Декомпозиция системы всюду продолжается до тех пор, пока на нижнем уровне не будут получены элементы, принадлежащие разработанным типам, или сформулированы задачи создания необходимых элементов [1].

Зависимости между критериями выявляются, например, методами факторного анализа и математической статистики и представляют собой эмпирические закономерности или получаются на основе процедур оценки гипотез и взвешивания факторов.

Функционал качества принимался в виде

$$\Phi(S) = f\lambda_m + a\frac{1}{\lambda_m} + br + c\frac{1}{r}, \quad \lambda_m = \min_i \{\lambda_i\}, \quad r = \max_i \left\{ \frac{\lambda_i}{\lambda_m} \right\},$$

где $(-\lambda)_i$ – корни характеристического полинома, $\lambda_i > 0 \quad i = \overline{1, k}$; f, a, b, c – весовые константы.

В настоящее время наблюдается существенный разрыв в реализации процессов применения вычислительных систем при проектировании сложных технических систем (СТС), а также при подготовке их производства средств автоматизации производственных процессов. Все системы развивались независимо – системы CAD (Computer-Aided Design), системы CAM (Computer-Aided Manufacture) и системы компьютерного формирования и описания технологических процессов.

С целью повышения качества СТС, для уменьшения их себестоимости и сроков освоения в мировой практике широко используются производственные информационные технологии. Так, для генерации идей широко используются базы знаний, экспертные системы. При проведении научных исследований применяются автоматизированные системы научных исследований (АСНИ). В проектировании СТС и технологий их изготовления все более широкое распространение получают системы автоматизированного проектирования (САПР) различного назначения. В производстве СТС применяются автоматизированные системы управления. Применение данных автоматизированных систем позволяет увеличить производительность труда и повысить качество выпускаемых изделий.

Более значительный эффект обеспечивается при объединении этапов создания СТС на основе использования информационных технологий. Результатом такого объединения является компьютеризированное интегрированное производство или Computer Integrated Manufacturing (CIM), CASE-технологии (Computer Aided Software Engineering) и методики [4].

В мировой практике в последнее десятилетие в различных сферах производства и эксплуатации образцов СТС интенсивно ведутся работы по созданию и практическому использованию прикладных CALS-технологий. В настоящей работе разрабатываются формальный подход, методы и средства создания информационных технологий ситуационного управления процессами конструкторско-технологической подготовки производства СТС применительно к условиям и требованиям всех фаз жизненного цикла образцов заданного класса.

Системный подход к проблеме проектирования СТС

Современный уровень развития производства указывает на настоятельную необходимость новой методологии проектирования СТС, создаваемой на основе формализации процесса проектирования, а также разработки новых принципов использования современных информационных технологий и программных комплексов, позволяющих учесть методы и средства реализации автоматизированной разработки СТС на каждом из этапов жизненного цикла, а также возникающие особенности каждого предприятия. При этом следует предусмотреть применение современных тенденций в развитии CALS-технологии – «виртуальные предприятия».

Традиционный путь «от конструкции к технологии» во многом устарел, так как именно современные технологии во многом определяют конструктивное решение синтеза СТС. Структура предприятия меняется от традиционной иерархической к структуре «команд процессов», в которой главными действующими лицами являются владельцы ресурсов, владельцы процессов и операторы процессов. В современной сложной системе создания СТС технология изготовления во многом является определяющим фактором для процесса проектирования конструкции.

Предлагается осуществить не иерархический, а сетевой подход, т.е. управление проектированием СТС должно вестись не по иерархическому, а по сетевому принципу, в котором техническое задание передается сразу на этапы как конструкторской, так и технологической подготовки производства. В варианте традиционных иерархических отношений рассчитывать на существенный выигрыш эффективности проектирования не приходится. В настоящее время выиграть могут команды с лидерами в различных предметных областях и видах обеспечения процесса синтеза СТС.

Традиционная информационная технология разработки СТС допускает дублирование и несогласованность данных, включение в рассмотрение недостаточно перспективных вариантов, в то

время как часть возможных решений остается вне поля зрения, допускает ошибки и потери информации и времени при ее передаче и обработке на основе средств CALS-технологии.

Идея создания интегрированных систем возникла уже давно. Первым шагом была интеграция в единый пакет решений CAD/CAM, но вопрос создания интегрированных с CAD-системами систем технологической подготовки производства остается нерешенным.

Целью создания интегрированных САПР является сокращение трудоемкости и сроков технической подготовки производства за счет совмещения этапов конструкторского и технологического проектирования и их автоматизации.

Необходимо организовать системную интеграцию при управлении жизненным циклом (ЖЦ) СТС, обеспечивающую передачу интеллектуальной собственности предприятия из систем CAD, производства и управления по всему предприятию, тем самым организуя обмен информацией с прочими подразделениями предприятия. В целях быстрого принятия лучших решений интеграция должна осуществляться на уровне процессов за счет установления рациональных правил и снижения затрат на экспертизу, автоматизации рабочих потоков и управления изменениями, а также за счет стандартизации методов совместного функционирования на уровне различных подразделений предприятия, поставщиков и подрядчиков, что будем рассматривать как организационную интеграцию.

Отсутствие системного подхода к проблеме автоматизации и тем более интеллектуализации процессов создания и эксплуатации СТС привело к тому, что локальная автоматизация отдельных этапов ЖЦ не дает ожидаемого существенного экономического эффекта, несмотря на то, что инвестиции в этот процесс весьма велики.

Предлагается функции конструирования, как на этапе конструкторской подготовки производства (КПП) – при проектировании основных изделий, так и на этапе технологической подготовки производства (ТПП) – для проектирования технологического оснащения и операционных эскизов, выполнять совместно в единой системе.

Обе системы (КПП/ТПП) должны обладать широким спектром функциональных возможностей, позволяющих накапливать и использовать приобретенные ранее знания и опыт проектирования – базу знаний, включающую прототипы изделий и технологические процессы их изготовления, нормативно-справочную информацию, правила проектирования и т.д. Для этого необходимо иметь набор модулей обработки знаний и специальный язык технологического проектирования.

Таким образом, систематизация методов построения моделей, которая заключается в создании методологии построения моделей широкого класса объектов проектирования (изделий, процессов), в разработке способов «стыковки» этих моделей, способов учета результатов исследования одних моделей при использовании других, а также согласование моделей и оперативная смена их параметров могут служить основой проектирования СТС. Это позволяет решить проблему высокоэффективного управления сложными иерархическими распределенными производственными комплексами за счет развития единого системного подхода на основе синтеза концептуальной модели предметной области.

Сформулированная системная цель определяет системные стратегии и схему структурной организации, которая в свою очередь определяется построением комплекса целей, включающих в себя цели системных стратегий. Для каждой цели определяются критерии и показатели, характеризующие их выполнение при заданных системных стратегиях. Затем формируется комплекс реакций, достигающих эти цели.

Разработка сложных технических систем

Относительная простота решения проблемы выработки проектных решений на отдельных этапах жизненного цикла СТС обеспечила создание эффективных методик решения весьма существенных, но в то же время отдельно стоящих задач, таких как проектирование, производство и эксплуатация сложных изделий. В то же время при этом наблюдается резкое различие в степени проработанности решения задач выработки проектных решений на различных этапах ЖЦ. Так, до сих пор передовые методологии проектирования во многих случаях не поддерживаются досконально проработанными и научно обоснованными методами машинного проектирования технологических систем, не говоря уже о процессах эксплуатации и утилизации промышленных изделий.

Существующий уровень автоматизации выработки проектных решений на этапах ЖЦ не может удовлетворять современным требованиям.

На этапе синтеза проектных решений, разработки первичного облика создаваемой системы принимается до 80 % решений, определяющих основное устройство и соответственно затраты на его создание. Недостаточность концептуально-теоретического аппарата, обслуживающего современную инженерную практику, приводит к тому, что принятие проектных решений происходит на основе эвристических процедур.

Рост масштабов и сложности создаваемых промышленных изделий требует дальнейшего развития концептуальных идей и соответственно инструментария обеспечения начальных этапов разработки, которые в значительной мере определяют технический облик создаваемого изделия и объем затрат на его производство.

Единое информационное пространство – это единая информационная среда, реализуемая средствами PDM (*Product Data Management*) системы и обеспечивающая совместную, согласованную работу конструкторов, технологов и других специалистов предприятия при выполнении работ по подготовке производства. Помимо информации об изделии (или продукте), в сфере ТПП не менее важную роль играет информация о процессах изготовления данного продукта, а также о ресурсах, необходимых для этого изготовления. Таким образом, ЕИП ТПП включает в себя информацию о продукте, процессах и ресурсах, которая может совместно использоваться конструкторами, технологами, управленцами и другими специалистами.

Интеграция базируется на использовании в процессе проектирования единых унифицированных конструктивно-технологических модулей (КТМ) – взаимосвязанных унифицированных фрагментов изделий (конструктивные модули) и фрагментов технологических процессов их изготовления.

Проектирование (как конструкторское, так и технологическое) осуществляется в едином цикле на этапе КПП, что значительно сокращает цикл технической подготовки производства. При проектировании изделий с помощью КТМ конструктор использует знания множества специалистов в области конструирования, технологии изготовления, стандартизации и другую информацию, заложенную в КТМ.

Система технологического проектирования должна обеспечивать два основных метода автоматизации технологического проектирования, как на базе типовых технологических процессов, так и на базе синтеза техпроцесса из элементарных технологических решений. Если в качестве КТМ принимается деталь и с ней ассоциируется технологический процесс, то реализуется первый метод. Если же в качестве КТМ принимаются фрагменты ТП, то реализуется второй метод.

Современные представления о системной организации основываются на идеях Л. фон Берталанффи, Н. Винера и других ученых. Систему можно рассматривать как организованный механизм – целостный механизм целесообразной организации обстоятельств. Эти обстоятельства возникают как результат хаотичного хода внешних событий. Оказывая на них воздействие, система формирует процесс достижения цели. Ее работа как организационного механизма заключается в синтезе процесса достижения цели из фрагментов разнородных процессов, составляющих внешние обстоятельства.

Наличие теоретически обоснованных процедур концептуального моделирования и развитие возможностей математического моделирования процессов функционирования технических систем позволяет развить существующие аспекты автоматизации проектирования СТС.

Предлагается подход, позволяющий интерпретировать закономерности построения (в первую очередь структуры целей и структуры действий) системы в отношении устройства искусственных (в частности, технических) систем и управления ими. Современный уровень теоретического описания гомеостаза достаточен для использования в инженерной практике. Он позволяет с высокой степенью конкретности и определенности использовать закономерности структурно-функционального построения системы при проектировании разнообразных технических объектов.

Если локальные цели конструкторского проектирования возможно реализовать существующими коммерческими пакетами прикладных программ (ППП), то «за кадром» остаются не менее существенные проблемы, решение которых до сих пор не найдено.

Это хорошо иллюстрируется практически полным отсутствием систем поддержки принятия управленческих решений на всех этапах ЖЦ изделия, кроме, пожалуй, этапа конструкторского

проектирования. Именно расширение зоны действия автоматизированных программ выработки проектных решений на всех этапах ЖЦ и составляет предмет нашего исследования.

В настоящее время после конструкторского проектирования, которое осуществляется на основе хорошо отлаженных коммерческих пакетов прикладных программ, на дальнейшие этапы ЖЦ передается уже готовое конструкторское решение, и методология управления дальнейшими проектными решениями, по существу, сводится к подгонке существующей технологической, производственной и т.п. базы под готовое решение. На этих этапах исключен творческий процесс создания нового изделия, а приходится работать с наперед данными изделиями. Процесс доводки занимает много времени, требует множеств согласований, что резко снижает эффект от проведенной автоматизации этапа конструкторского проектирования.

Ощущается существенный недостаток системности при решении комплексной задачи обеспечения эффективности функционирования систем поддержки принятия решений на всех этапах ЖЦ. Необходим единый подход, связывающий воедино процессы управления на всех этапах ЖЦ СТС, исключающий повторы и дублирование многих расчетных процедур, применяемых разными группами разработчиков.

Процесс проектирования сложных наукоемких изделий неразрывно связан, а во многом и определяется процессами переработки информации, работой с информационными объектами (математическими, графическими и т.п. моделями). Поэтому синтез концептуальных моделей предметной области проектирования целесообразно провести на основе методологии создания концептуальных моделей информационных систем [3].

Построение концептуальной модели является первым этапом синтеза любой математической модели. Неосознанно она реализуется постоянно при разработке конструкций СТС в виде существующего в голове проектировщика прототипа некоторого конструктива, над созданием которого он работает (если в голове у конструктора нет концепции будущего изделия, то никакая автоматизация не позволит ему создать современное изделие). Прототип может иметь вполне реальную реализацию либо быть гипотетическим.

Концептуальное проектирование, на наш взгляд, позволит учесть передовой опыт и существующий на предприятии уровень технологий, опыт эксплуатации, утилизации и т.д. на начальном этапе проектирования.

Основой построения концептуальной модели может выступать проектная модель технической системы, представляемая комплектом технической документации. Она позволяет накапливать и хранить сведения о создаваемой системе, появляющиеся по мере конкретизации представлений об ее устройстве, начиная с момента формулирования цели их создания.

Процесс разработки сложной технической системы можно представить с помощью рис. 1.

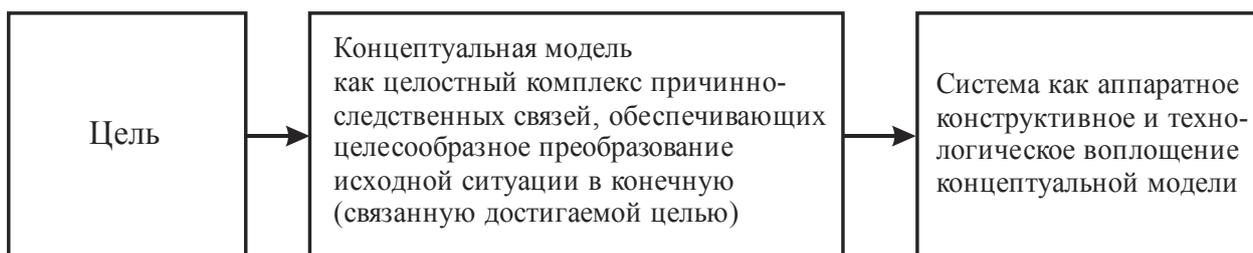


Рис. 1. Содержание процесса разработки сложной технической системы

Комплекс причинно-следственных связей определяет структурированную совокупность действий, обеспечивающих целесообразность функционирования технической системы и ее целостность. Выполнение этих действий осуществляется с помощью соответствующих устройств, что позволяет разработать аппаратное и конструктивное устройство создаваемой технической системы [5].

Это позволяет определить технологию процесса разработки СТС, общая схема которой представлена на рис. 2. Она включает два основных этапа: разработку концептуальной модели и разработку количественной модели. Сложность интеграции указанных этапов, в особенности автоматизации синтеза концептуальной модели предметной области и обеспечения информацион-

ного согласования этого процесса с промышленными пакетами САПР, и определяет актуальность данной работы.

Сформулированная системная цель определяет системные стратегии и схему структурной организации, которая в свою очередь определяется построением комплекса целей, включающих в себя цели системных стратегий. Для каждой цели определяются критерии и показатели, характеризующие их выполнение при заданных системных стратегиях. Затем формируется комплекс реакций, достигающих эти цели. Это позволит определить состав естественных процессов, из которых будет синтезирована схема функционирования технической системы. Их свойства будут использоваться как ресурсы управления, которые могут выступать как пассивными (реализуемыми в конструкции), так и активными (реализуемыми в виде устройств) механизмами управления.

Выявленный состав процессов дает возможность формирования математического описания процесса функционирования технической системы [6].

На основе этого формулируется структурированный комплекс целей, характеризующий организацию технической системы, и действий, реализующих функции, обеспечивающие целесообразность и целостность работы концептуальной модели [7].

Количественное моделирование представляет собой формализацию понятийного описания до уровня получения количественных оценок. Тогда же осуществляется разработка математических, графических и т.п. моделей.

Разработка концептуальной моделей



Рис. 2. Общая схема процесса разработки СТС

В качестве модели формального описания предметной области ситуационного управления процессами проектирования СТС используется кортеж составляющих вида

$$M_{\text{ПО}} = \langle M_{\text{ОУ}}, W_{er}^{\text{BM}}, R_{er}, O, \Pi, Q, Y, D, K, H, D \rangle,$$

где $M_{\text{ОУ}} = (M_{\Pi}^S, M_{\text{СНПИ}}^S, M_{\Pi}^F, M_{\text{СНПИ}}^F)$ – модель представления объекта управления, здесь $M_{\Pi}^S, M_{\text{СНПИ}}^S$ – структурно-конструктивная модель процесса проектирования СТС; $M_{\Pi}^F, M_{\text{СНПИ}}^F$ – функциональная модель процессов проектирования СТС. В качестве указанных моделей используются дифференциальные и алгебраические системы уравнений, полихроматический направленный логический граф и нечеткие уравнения в отношениях: W_{er}^{BM} – подмножество критичных факторов внешнего мира (среды); R_{er} – подмножество критичных процессов проектирования и режимов функционирования СТС заданного класса; O – перечень класса проектируемых предприятием СТС; Π – подмножество последовательностей экспериментов оценки степени технико-экономического совершенства методов, средств проектирования и проектных решений СТС; Q – допустимое подмножество нештатных ситуаций объектами управления; Y – подмножество вход-выходных показателей (параметров, признаков), характеризующее состояние объекта управления; D – допустимое подмножество маршрутов активных действий; K – перечень критериев тактико-экономической оценки степени совершенства процессов проектирования и проектных решений СТС; H – подмножество целей, поставленных в рамках предметной области, достигаемых средствами информационных технологий (ИТ); D – перечень допусковых зон и пороговых уровней ограничения процессов проектирования и технико-экономического совершенства проектных решений СТС.

Методология построения ИТ предусматривает реализацию формального подхода к созданию распределенных мультиагентных систем ситуационного управления проектированием СТС, в которых в качестве интеллектуальных агентов могут выступать программные модули, автономные ИТ и экспертные информационно-управляющие комплексы.

Таким образом, появляется возможность формировать более совершенные технические решения, повысить эффективность проектирования, снизить потери на исправление погрешностей проектирования.

Только анализ системных связей позволяет выявить системные свойства, определить совокупность целей проектирования при этом, чем полнее он будет, тем с большей вероятностью будет сделано правильное проектное решение. Зная цель, можно подыскать (в автоматическом, автоматизированном режиме либо на базе средств технической имитации интеллекта) эффективное средство для ее достижения.

Без подобной расшифровки общей цели функционирования невозможно обойтись при создании современной промышленной среды.

Заключение

Технико-экономическая эффективность использования ИТ в задачах ситуационного управления процессами проектирования СТС определяется, главным образом, сокращением временного цикла проектирования и снижением материально-экономических затрат за счет информационной поддержки формализованных методов проектирования; идентификации проектных недоработок, распознавания причин и принятия обоснованных решений по устранению этих причин на ранних этапах проектирования в результате комплексного анализа в пространственно-временном представлении больших массивов разнородной информации, регистрируемой в процессе проведения ускоренных (критичных) испытаний ВВТ и их составных компонентов.

Возможность системной организации процесса выработки проектных решений на этапах разработки и производства СТС обеспечивает получение экономического эффекта на всех последующих этапах ЖЦ цикла за счет рационализации процессов выработки проектных решений по всем перечисленным выше аспектам.

Список литературы

1. Данилов, А. М. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / А. М. Данилов, И. А. Гарькина, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1. – С. 3–11.

2. Юрков, Н. К. Системная организация жизненного цикла промышленных изделий / Н. К. Юрков, Л. А. Тюрина // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 8–12.
3. Von Bertalanffy L. General System Theory (Foundation, Development, Application) / L. Von Bertalanffy. – N.-Y., 1973.
4. Юрков, Н. К. Модели и алгоритмы управления интегрированными производственными комплексами / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 198 с.
5. Юрков, Н. К. Системный подход к проблеме принятия управленческих решений / Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – Т. 1. – С. 84–87.
6. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество – 2011 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 104–106.
7. Кузьмин, И. А. Распределенная обработка информации в научных исследованиях / И. А. Кузьмин, В. А. Путилов, В. В. Фильчаков. – Л. : Наука, 1991. – 304 с.

УДК 681.5:004.414

Юрков, Н. К.

Системный подход к организации жизненного цикла сложных технических систем / Н. К. Юрков, В. А. Ушаков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 27–34.

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет,
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(841-2) 56-43-46
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Предлагается осуществить совмещение этапов конструкторского и технологического проектирования за счет организации системной интеграции при управлении жизненным циклом сложных технических систем (СТС), обеспечивающее передачу интеллектуальной собственности предприятия из систем автоматизации проектирования, производства и управления по всему предприятию, тем самым организуя обмен информацией с прочими подразделениями предприятия. Подготовка производства ведется не по иерархическому, а по сетевому принципу, когда техническое задание на проектирование СТС передается одновременно на этапы как конструкторской, так и технологической подготовки производства.

Ключевые слова: системный анализ, сложная техническая система, безопасность, жизненный цикл, конструкторская подготовка, технологическая подготовка.

N. Yurkov

Doctor of Technical Science, professor, the managing of department construction and the production of radio equipment
Penza state university
440026, Penza, Red street, 40.
(841-2) 56-43-46
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Abstract. Proposed combination of design and technological design phases, through systems integration in managing the lifecycle of complex technical systems (STS), which provides transfer of intellectual property rights of enterprise automation systems design, production and management across the enterprise, thus organizing the exchange of information with other units of the company. Preparation of production is not hierarchical, and to network with the technical specification for design of SPC is transmitted simultaneously on both stages of design and technological preparation of production.

Key words: system analysis, complex engineering system, security, life cycle, design, technological preparation of production.

БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТА

А. В. Бецков

Рассмотрим особо важную стационарную систему как объект защиты (ОЗ), имеющий систему безопасности (СБ). Полагаем, что в каждый момент времени объект защиты может находиться в одном из двух состояний: работоспособном или отказа, а система безопасности в одном из трех состояний: работоспособном, ложного отказа (ложное срабатывание) или опасного отказа (несрабатывание). Предполагается, что при ложном отказе СБ или в случае отказа ОЗ при исправной СБ система немедленно выводится в состояние безопасного останова. Отказ ОЗ при опасном отказе СБ считается недопустимым событием (авария, ЧП). Таким образом, в каждый момент времени система может находиться в одном из следующих состояний:

- БФ – безопасное функционирование (работоспособный ОЗ, при работоспособной СБ);
- БО_с – безопасный останов вследствие отказа ОЗ при работоспособном СБ (предотвращение ЧП);
- БО_т – безопасный останов из-за ложного отказа СБ;
- ОФ – опасное функционирование (функционирование ОЗ при опасном отказе СБ).

В такой постановке для исследуемой системы можно построить граф состояний и переходов полумарковской модели процесса функционирования системы (рис. 1).

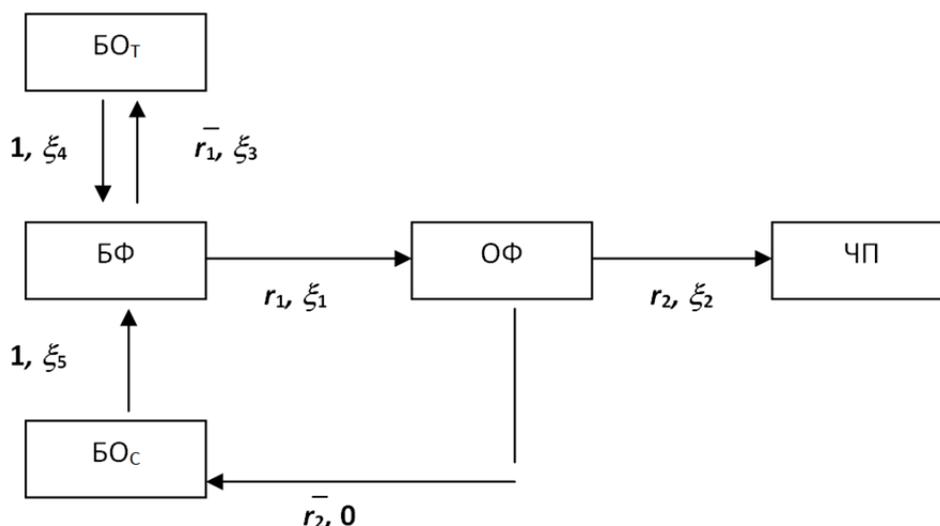


Рис. 1. Граф состояний и переходов функционирования системы:
 r_i – вероятность перехода; $\bar{r}_i = 1 - r_i$; ξ – случайное время до перехода в i -состояние

Обозначим элементарные (первичные) события системы: a – отказ ОЗ; b – ложный отказ СБ; c – опасный отказ СБ. Далее эти обозначения мы будем использовать для случайных наработок элементов до наступления соответствующих событий.

Случайные наработки a , b , c считаем независимыми, а их функции распределения будут $F_a(t)$, $F_b(t)$, $F_c(t)$. Будем полагать, что состояние СБ соответствует тому из событий b , c , которое наступило раньше, например, в случае $b \leq c$ считается, что СБ находится в состоянии ложного отказа.

Для ведения исследований по полумарковской модели (см. рис. 1) необходимо определить вероятности r_1 , r_2 , а также средние времена пребывания в состоянии до выхода из них. Для этого

предположим, что восстановление после безопасных остановов не происходит. Граф состояний и переходов для этого случая можно представить в следующем виде (рис. 2).

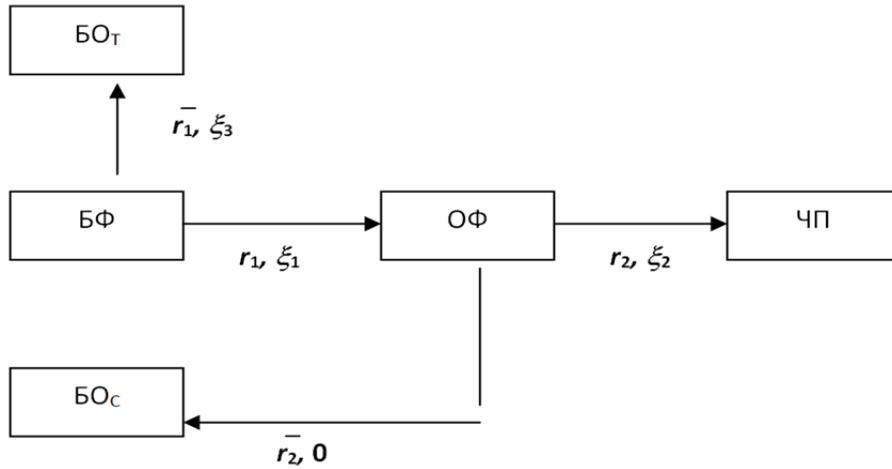


Рис. 2. Граф состояний и переходов полумарковской модели

Здесь ОЗ – СБ в отсутствии восстановления после остановов и отказов.

Состояние системы в некоторый момент t будем описывать многозначной логической (индикаторной) переменной $Q \in \Omega = \{БОТ, БОС, ОФ, ЧП\}$. В момент времени t происходит некоторое событие. Состояние системы в момент времени t зависит от порядка наступления элементарных событий a, b, c, t . Для описания зависимости Q от порядка наступления элементарных событий используем последовательное дерево событий [1]. В последовательном дереве событий ставятся элементарные события так, что любому пути из корневой вершины v_0 в некоторую вершину v , а значит, и к самой вершине v , однозначно соответствует некоторая последовательность элементарных событий в порядке их наступления, которой, в свою очередь, соответствует некоторое состояние системы – $Q(v)$ из множества $\Omega \cup z$, где z означает «состояние не определено». В усеченном (редуцированном) последовательном дереве событий «висячими» («листьями») являются такие вершины, для которых $Q(v) \neq z$, и все их потомки в полном последовательном дереве событий также имеют значение $Q(v)$ [2]. Усеченное последовательное дерево событий для исследуемой системы можно представить на рис. 3.

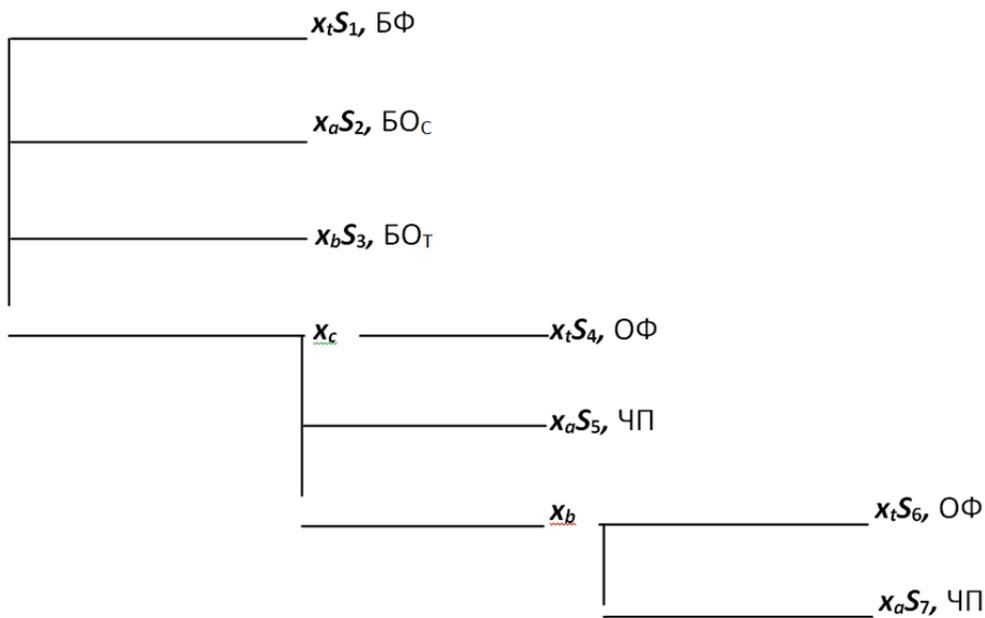


Рис. 3. Усеченное последовательное дерево событий ОЗ – СБ

«Листьям» усеченного последовательного дерева событий соответствуют сложные события, т.е. множества последовательностей элементарных событий, которые обозначим $S_1 - S_7$:

$$S_1 = \{t \leq a, t \leq b, t \leq c\}, S_2 = \{a \leq t, a \leq b, a \leq c\}, S_3 = \{b \leq t, b \leq a, b \leq c\}, S_4 = \{c \leq t, t \leq a, t \leq b\},$$

$$S_5 = \{c \leq a, a \leq b, a \leq b\}, S_6 = \{c \leq b \leq t \leq a\}, S_7 = \{c \leq b \leq a \leq t\}.$$

Зная распределение случайных величин a, b, c , вероятности событий $S_1 - S_7$ можно определить следующим образом.

Обозначим $P_i = P\{S_i\}, i = \overline{1, 7}, \bar{F} = 1 - F$.

Тогда

$$P_1 = \bar{F}_a(t) \otimes \bar{F}_b(t) \otimes \bar{F}_c(t); P_2 = \int_0^t \bar{F}_b(x) \otimes \bar{F}_c(x) dF_a(t);$$

$$P_3 = \int_0^t \bar{F}_a(x) \otimes \bar{F}_c(x) dF_b(t); P_4 = F_c(t) \otimes \bar{F}_a(t) \otimes F_b(t);$$

$$P_5 = \int_0^t F_c(x) \otimes \bar{F}_b(x) dF_a(x); P_6 = \bar{F}_a(t) \otimes \int_0^t F_c(x) dF_b(x);$$

$$P_7 = \int_0^t \int_0^x F_c(y) dF_b(y) dF_a(y), \quad (1)$$

где \otimes – знак Кронекерского умножения.

Как видно из (1), вероятности $P_i = P\{S_i\}, i = \overline{1, 7}$ являются функциями времени $P_i(t), i = \overline{1, 7}$. В силу несовместимости $S_1 - S_7$ (см. рис. 1) можно определить вероятности состояний системы:

$$P_{\text{БФ}}(t) = P\{Q(t) = \text{БФ}\} = P_1(t);$$

$$P_{\text{БО}_c}(t) = P\{Q(t) = \text{БО}_c\} = P_2(t);$$

$$P_{\text{БО}_T}(t) = P\{Q(t) = \text{БО}_T\} = P_3(t);$$

$$P_{\text{ОФ}}(t) = P\{Q(t) = \text{ОФ}\} = P_4(t) + P_6(t);$$

$$P_{\text{ЧП}}(t) = P\{Q(t) = \text{ЧП}\} = P_5(t) + P_7(t). \quad (2)$$

Зная вероятности состояний системы (2) для случая отсутствия восстановления после безопасных остановов (см. рис. 1), можно определить вероятности r_1, r_2 . Обозначим $P(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t)$.

В соответствии с рис. 1 имеем

$$P_{\text{БО}_T}(\infty) = \bar{r}_1 = 1 - r_1; P_{\text{БО}_c}(\infty) = r_1 \times \bar{r}_2 = r_1 \times (1 - r_2);$$

$$P_{\text{ЧП}}(\infty) = r_2 \times r_1.$$

Откуда

$$r_1 = 1 - P_{\text{БО}_T}(\infty), r_2 = 1 - P_{\text{БО}_c}(\infty) / r_1. \quad (3)$$

Тогда представляется возможным определить распределение случайных величин ξ_1 и ξ_2 , $\xi_1 + \xi_2$:

$$F_{\xi_1}(t) = P_{\text{БО}_T}(t) / P_{\text{БО}_T}(\infty); F_{\xi_2}(t) = P_{\text{БО}_c}(t) / P_{\text{БО}_c}(\infty). \quad (4)$$

Пользуясь (4), найдем $M\xi_1, M\xi_2, M\xi_3$:

$$M\xi_1 = \int_0^{\infty} F_{\xi_1}(t) dt; M\xi_2 = \int_0^{\infty} \bar{F}_{\xi_1 + \xi_2}(t) dt - M\xi_1;$$

$$M\xi_1 = \int_0^{\infty} \bar{F}_{\xi_1}(t) dt. \quad (5)$$

Здесь $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$.

При известных вероятностях (2) и математических ожиданиях (5) можно определить средние времена пребывания в невозвратных состояниях системы до выхода из них (для модели рис. 1):

$$T_{\text{БФ}} = \int_0^{\infty} P_{\text{БФ}}(t) dt; \quad T_{\text{ОФ}} = r_2 \times M\xi_2. \quad (6)$$

Определив $T_{\text{БФ}}$ и $T_{\text{ОФ}}$, рассмотрим состояние (модель на рис. 3), которое учитывает восстановление системы после безопасных остановов. Запишем $T_{\text{БО}_C} = M\xi_3$; $T_{\text{БО}_T} = M\xi_4$, которые означают среднее время ($T_{\text{БО}_C}$ и $T_{\text{БО}_T}$) пребывания системы в состояниях БО_C и БО_T соответственно.

На основании топологического метода расчета (метод топологических уравнений Мейсона [3]) можно найти формулу (выражение) для расчета среднего времени до выхода системы в ЧП $T_{\text{ЧП}}$ с учетом восстановлений после безопасных остановов [4]:

$$T_{\text{ЧП}} = T_{\text{БФ}} / (r_1, r_2) + T_{\text{ОФ}} / r_2 + \bar{r}_1 T_{\text{БО}_T} / (r_1, r_2) + \bar{r}_2 T_{\text{БО}_C} / r_2. \quad (7)$$

Можно получить (определить) следующие величины:

$T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}}$ – среднее суммарное время безопасного функционирования и среднее число попаданий в состояние БФ, $n_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}}$ до выхода в аварию

$$T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} = T_{\text{БФ}} / r_1 r_2; \quad n_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} = 1 / r_1 r_2; \quad (8)$$

$T_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}}$ – среднее суммарное время опасного функционирования и среднее число попаданий в состояние ОФ $n_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}}$ до выхода в аварию:

$$T_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}} = T_{\text{ОФ}} / r_2; \quad n_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}} = 1 / r_2; \quad (9)$$

$T_{\text{ЗМТ}}^{\text{ЧП}}$ – среднее суммарное время восстановления после попадания в состояние БО_C и среднее число попаданий в состояние БО_C $n_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}}$ до выхода в аварию:

$$T_{\text{ЗМТ}}^{\text{ЧП}} = \bar{r}_2 T_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}} / r_2; \quad n_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}} = \bar{r}_2 / r_2. \quad (10)$$

Заметим, что величина $n_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}}$ равна среднему предотвращенных аварийных ситуаций, приходящихся на одну аварию, имеющую место, и в этом смысле является показателем *статистической безопасности*.

Введем следующие показатели оценки обеспечения безопасности функционирования системы.

1. Коэффициент опасности функционирования системы

$$k_{\text{МФ}}^{\text{ЧП}} = T_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}} / (T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} + T_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}}). \quad (11)$$

Данный коэффициент показывает, насколько опасна работающая исследуемая система.

2. Коэффициент безопасности функционирования системы

$$k_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} = 1 - k_{\text{МФ}}^{\text{ЧП}} = T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} / (T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} + T_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}}). \quad (12)$$

Рассмотрим задачу для случая, когда наработки a , b , c имеют экспоненциальное распределение с параметрами λ_a , λ_b , λ_c . Соответственно обозначим

$$T_a = 1 / \lambda_a; \quad T_b = 1 / \lambda_b; \quad T_c = 1 / \lambda_c; \quad \lambda^* = \lambda_a + \lambda_b + \lambda_c; \quad T^* = \frac{1}{\lambda^*}.$$

Запишем следующие соотношения:

а) без учета восстановлений после безопасных остановов:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{БФ}} &= \exp(-\lambda^* \times t); P_{\text{БО}_c} = P_{\text{БФ}} \times \lambda_a / \lambda^*; P_{\text{БО}_T} = P_{\text{БФ}} \times \lambda_b / \lambda^*; \\
 P_{\text{ОФ}} &= \exp(-\lambda_0 \times t) \times (1 - \exp(-(\lambda_b + \lambda_c) \times t)) \times \lambda_c / (\lambda_b + \lambda_c); \\
 P_{\text{ЧП}} &= (1 - \exp(-\lambda_a \times t)) \times \lambda_c / (\lambda_b + \lambda_c) - (1 - \exp(-\lambda^* \times t)) \times \lambda_a \lambda_c / \lambda^* (\lambda_b + \lambda_c); \\
 P_{\text{БО}_c}(\infty) &= \lambda_a / \lambda^*; P_{\text{БО}_T}(\infty) = \lambda_b / \lambda^*; P_{\text{ЧП}}(\infty) = \lambda_c / \lambda^*; \\
 r_1 &= (\lambda_a + \lambda_c) / \lambda^*; r_2 = \lambda_c / (\lambda_a + \lambda_c); \\
 M\xi_1 &= T^*; M\xi_2 = T_a; M\xi_3 = T^*.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Для приближенных вычислений при $\lambda^* \times t \ll 1$ можно воспользоваться формулами

$$P_{\text{БФ}} \cong 1 - \lambda^* \times t; P_{\text{БО}_c} \approx \lambda_a \times t; P_{\text{БО}_T} \approx \lambda_b \times t, \tag{14}$$

которые получаются после разложения соответствующих вероятностей в ряд Тейлора до линейных членов и несложных преобразований. Линейная аппроксимация вероятности $P_{\text{ЧП}}(t)$ дает $P_{\text{ЧП}}(t) \approx 0$, т.е. явно недостаточна. Более точное приближение получается при разложении до квадратных членов, и после простых преобразований будем иметь

$$P_{\text{ЧП}} \cong \lambda_a \times \lambda_c \times t^2 / 2, \tag{15}$$

которое может быть использовано при оценке вероятностей состояний системы с отсчетом времени от момента восстановления системы после безопасного останова (аналитично (1));

б) с учетом восстановления после безопасных остановов: $T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}}$ – средние суммарные времена пребывания в состоянии до выхода в аварию $T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} = T_c$; $T_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}} = T_a$; $T_{\text{ЗМТ}}^{\text{ЧП}} = T_c \times T_{\text{БО}_T} / T_b$; $T_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}} = T_c \times T_{\text{БО}_c} / T_a$; $n_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}}$ – среднее количество попаданий в состояния до выхода в аварию будем определять следующим образом:

$$\begin{aligned}
 n_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} &= 1 + T_c / T_b + T_c / T_a; n_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}} = 1 + T_c / T_a; n_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}} = T_c / T_a; \\
 n_{\text{ЗМТ}}^{\text{ЧП}} &= T_c / T_b,
 \end{aligned}$$

T_a – среднее время эксплуатации системы до выхода в аварию

$$T_a = T_c + T_a + T_c \times T_{\text{БО}_T} / T_b + T_c \times T_{\text{БО}_c} / T_a.$$

Для примера рассмотрим оценку безопасности работы химического предприятия по производству жидкого базового компонента, функционирование атомного реактора подводной лодки или космического корабля.

Пусть

$$T_a = 100000; T_b = 5000; T_c = 1000000; T_{\text{БО}_T} = 1; T_{\text{БО}_c} = 48; t = 100.$$

Получим:

а) без учета восстановления после безопасных остановов

$$\begin{aligned}
 P_{\text{БФ}}(100) &= 0,9789; P_{\text{ОФ}}(100) = 10^{-4}; P_{\text{БО}_c}(100) = 10^{-3}; \\
 P_{\text{БО}_T}(100) &= 2 \times 10^{-2}; P_{\text{ЧП}}(100) \cong 5 \times 10^{-8};
 \end{aligned}$$

б) с учетом восстановления после безопасных остановов

$$\begin{aligned}
 T_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} &\approx 10^6; n_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} \approx 211; T_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}} \approx 10^5; n_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}} \approx 11; T_{\text{БО}_T} \approx 200; n_{\text{ЗМТ}}^{\text{ЧП}} \approx 200; \\
 T_{\text{БО}_c} &\approx 480; n_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}} \approx 10; T_{\text{ЧП}} \approx 1100680; k_{\text{МФ}}^{\text{ЧП}} \approx 0,0909; k_{\text{ЗФ}}^{\text{ЧП}} \approx 0,909.
 \end{aligned}$$

Заметим, что $n_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}}$ учитывает и те попадания в состояние ОФ (нулевой длительности), которые предшествуют выходу в состояние БОС.

Величины $n_{\text{ОФ}}^{\text{ЧП}}$, $n_{\text{ЗМС}}^{\text{ЧП}}$ означают, что вероятность несрабатывания СБ на одно требование примерно равно 10^{-1} , т.е. СБ в среднем пропускает одно требование из 11. Величина $k_{\text{МФ}}^{\text{ЧП}}$ показывает, что при работе системы примерно 9 % времени она пребывает в состоянии опасного функционирования.

Если показатели $P_{\text{ОФ}}(100)$, $P_{\text{ЧП}}(100)$, $T_{\text{БФ}}$, $T_{\text{ЧП}}$ будут кажущимися оптимистическими, то показатель – коэффициент $k_{\text{МФ}}^{\text{ЧП}}$ – достаточно мал, и его величина означает осторожность в дальнейшем функционировании исследуемой системы.

Данный пример подтверждает следующие выводы.

Безопасность системы определяется надежностью СБ по отношению к опасным отказам. Имеется четыре вида ресурсных характеристик исследуемой системы:

- ресурс времени по безопасности;
- ресурс времени по безотказности;
- ресурс числа попаданий в безопасное состояние;
- ресурс числа попаданий в неработоспособное состояние.

Каждая из этих характеристик или все вместе должны использоваться в качестве критерия при оптимизации эксплуатации сложной технической системы [5].

Список литературы

1. Северцев, Н. А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке / Н. А. Северцев. – М. : Высш. шк., 1989. – 431 с.
2. Дедков, В. К. Косвенные методы прогнозирования надежности / В. К. Дедков, Н. А. Северцев. – М. : ВЦ РАН, 2006. – 270 с.
3. Дивеев, А. И. Универсальные оценки безопасности / А. И. Дивеев, Н. А. Северцев. – М. : РУДН, 2005. – 86 с.
4. Северцев, Н. А. Системный анализ и моделирование безопасности / Н. А. Северцев, В. К. Дедков. – М. : Высш. шк., 2006. – 461 с.
5. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество – 2011 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 104–106.

УДК 681.31

Бецков, А. В.

Безопасность и надежность системы защиты объекта / А. В. Бецков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 35–40.

Бецков Александр Викторович

доктор технических наук, доцент,
Академия управления МВД России,
125171, г. Москва,
ул. Зои и Александра Космодемьянских, д. 8.
8(499) 150-10-34
E-mail: aviaspacenext@inbox.ru

Аннотация. Проводится анализ стационарных систем безопасности (СБ) объектов. Предполагается, что при ложном отказе СБ или в случае отказа объекта защиты (ОЗ) при исправной СБ система немедленно выводится в состояние безопасного останова. Отказ ОЗ при опасном отказе СБ считается недопустимым событием (авария, ЧП). Предлагается безопасность системы определять надежностью СБ по отношению к опасным отказам. Формулируются четыре вида ресурсных характеристик защищаемой системы.

Ключевые слова: объект защиты, система безопасности, отказ, авария, безопасное функционирование, случайные наработки.

A. Betskov

doctor of technical science, docent the department
Academy for control MVD of Russia
125171, Moscow,
Zoy and Alexander Kosmodemianskys street, 8.
8(499) 150-10-34
E-mail: aviaspacenext@inbox.ru

Abstract. The analysis of stationary systems of protection of objects, as the object having the safety system (SS) is carried out. It is supposed that at false refusal of SS, or in case of refusal the object of protection (OP) at serviceable SB the system is immediately removed in a condition safe останова. OP refusal at dangerous refusal of SS is considered an inadmissible event (accident, state of emergency). It is offered to determine safety of system by reliability of SS in relation to dangerous refusals. Four types of resource characteristics of protected system are formulated

Key words: object of protection, safety system, refusal, accident, safe functioning, casual practices.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.396.6

СТРАТЕГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ С КОНЕЧНЫМ МНОЖЕСТВОМ СОСТОЯНИЙ

В. А. Капганов

Введение

Объектом исследования являются управляемые полумарковские процессы (УПМП) с конечным множеством состояний, которые находят широкие приложения в практических задачах. Примерами могут служить задачи оптимизации технического обслуживания, рассматриваемые в теории надежности, задачи управления системами массового обслуживания.

В *прикладном аспекте* задачи выбора оптимальной стратегии технического обслуживания (управляемые модели надежности) ставились давно и в настоящее время излагаются в учебниках и учебных пособиях (монографии и учебники на русском языке) [1–5].

В *теоретическом аспекте* задачи математической теории надежности могут быть сформулированы как задачи управления некоторым случайным процессом. Подробная постановка изложена в [6].

Модель сводится к следующему:

- объект управления – случайный процесс, так как эволюция технической системы происходит во времени в условиях стохастической неопределенности;
- проведение восстановительных работ – это управление процессом функционирования (когда и какие восстановительные работы проводить);
- цель управления – получить наибольший эффект (максимальную эффективность) от эксплуатации (функционирования) этой системы.

Аналогичная постановка для моделей массового обслуживания:

- объект управления – случайный процесс, описывающий эволюцию СМО во времени;
- управление процессом функционирования СМО можно осуществлять, меняя либо входящий поток требований, либо выбор распределений длительности обслуживания, либо меняя структуру СМО;
- цель управления – получить наибольший эффект (максимальную эффективность) от функционирования этой системы массового обслуживания.

Для моделей массового обслуживания и для моделей надежности задача сводится к оптимизации целевого функционала, определению класса распределений, на которых достигается его экстремум.

Теория полумарковских процессов и их приложения изложена в ряде монографий [7–9].

Как известно однородный полумарковский процесс задается начальным распределением вероятностей состояний и однородным полумарковским ядром $Q_{ij}(t, u)$, где состояния $i, j \in E$, E – конечное множество состояний, параметр t определяет время, $t \in [0, \infty)$, $u \in U$, U – множество управлений с σ -алгеброй \mathcal{B} , и вероятностными мерами $G_i(A)$, $i \in E$, определенными на элементах σ -алгебры \mathcal{B} , $A \in \mathcal{B}$. Множество описанных вероятностных мер определяет множество управлений. Полумарковское ядро $Q_{ij}(t, u)$ определяется как условная вероятность того, что переход случайного процесса произойдет до момента t в состояние j при условии, что процесс стартовал из состояния i и принято решение u . Заметим, однородность означает независимость полумарковского ядра ни от номера перехода, ни от момента старта.

При постановке задачи управления на траекториях УПМП необходимо построить функционал, определяющий качество управления. Для построения этого функционала задаются функции $R_{ij}(t, u)$, $i, j \in E$, $t \in [0, \infty)$, $u \in U$, которые определяются как математическое ожидание накопленного эффекта за время t при условии, что процесс пребывает в состоянии i , переходит в момент t в состояние j и принято решение u [10]. Такое определение функций $R_{ij}(t, u)$ дает возможность исследовать практические модели, в которых УПМП является вложенным в некоторый более сложный случайный процесс, описывающий физическую эволюцию рассматриваемой системы. Другими словами, УПМП между соседними марковскими моментами не меняет своего значения, а случайный процесс, описывающий физическую эволюцию рассматриваемой системы, изменяется. Коль скоро накопленный эффект зависит от случайного процесса, описывающего физическую эволюцию, то, естественно, ввести в рассмотрение математические ожидания $R_{ij}(t, u)$. Накопленный эффект на периодах между соседними марковскими моментами изменения состояний УПМП суммируется. Качество управления характеризуется математическим ожиданием $S_i(t)$ накопленного эффекта за время $(0, t)$ при условии, что в нулевой момент времени УПМП стартует из состояния i .

Задача управления

При постановке и решении задачи управления возникают следующие математические проблемы:

- построение асимптотического разложения функционала $S_i(t)$ при $t \rightarrow \infty$ в зависимости от свойств полумарковского процесса, в частности, от свойств вложенной цепи Маркова;
- исследование структуры функционала $S_i(t)$ относительно вероятностных мер $G_i(A)$, определяющих в рассматриваемой модели марковскую однородную рандомизированную стратегию управления;
- определение класса распределений, на которых достигается экстремум целевого функционала.

При фиксированном наборе вероятностных мер $G_i(A)$, $i \in E$ (фиксирована стратегия управления) имеем фиксированный УПМП, при постановке задачи оптимизации нужно задать множество стратегий управления (множество наборов вероятностных мер). Определяем множество возможных стратегий условиями $G_i \in \Omega_i$, $i \in E$, или $\vec{G} \in \prod_{k=1}^N \Omega_k = \Omega$, где $\vec{G}(A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_{k=1}^N G_k(A_k)$.

Предполагается, что множество Ω является множеством допустимых стратегий управления, для которых исследуемые функционалы существуют. Таким образом, получаем множество допустимых стратегий управления и, следовательно, множество возможных УПМП. Математическая задача состоит в определении такой стратегии из множества Ω (такого УПМП), для которой значение целевого функционала принимает экстремальное значение (минимум или максимум).

Предельное поведение функционалов, построенных на траекториях УПМП, исследовано в ряде работ [11–13].

В случае, когда вложенная цепь эргодическая, математическое ожидание построенного функционала при $t \rightarrow \infty$ ведет себя как линейная функция $S_i(t) = St + o(t)$.

В случае, когда вложенная цепь поглощающаяся, математическое ожидание построенного функционала при $t \rightarrow \infty$ стремится к константе S . Аналогичный результат справедлив при исследовании функционала с переоценкой [13].

Коэффициент при линейном члене в случае эргодической цепи и предельное значение функционалов в других случаях определяют значения *целевых функционалов*, которые исследуются на экстремум.

Вторая проблема, относящаяся к выяснению зависимости целевого функционала от распределений, определяющих стратегию управления, освещена в ряде работ [10, 12].

Приведем результат, определяющий структуру целевого функционала.

Теорема [12]. Для управляемого полумарковского процесса с конечным множеством состояний $E = \{1, 2, \dots, N\}$ целевой функционал S является дробно-линейным функционалом

$$S(\bar{G}) = \frac{\int_{U^{(N)}} A(u)\bar{G}(du)}{\int_{U^{(N)}} B(u)\bar{G}(du)} \quad (1)$$

относительно вероятностных мер $\bar{G}(A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_{k=1}^n G_k(A_k)$, определяющих марковскую однородную рандомизированную стратегию, $U^{(N)}$ – прямое произведение пространства U , $A_k \in \mathbf{B}$.

Управление при полной информации о характеристиках управляемого процесса

В рассматриваемом случае поиск оптимальной стратегии управления сводится к исследованию на экстремум (максимум или минимум) дробно-линейного функционала в классе допустимых стратегий управления и к определению распределений, на которых достигается искомый экстремум. Решение этой проблемы для дробно-линейного функционала сводится к линейному случаю, поскольку справедливо следующее утверждение.

Лемма [10, 14]. Если существует максимум дробно-линейного функционала (1) по некоторому множеству распределений Ω , $G_i \in \Omega$, $i \in E$, то множество распределений, на котором достигается этот максимум, совпадает с множеством, на котором достигается максимум специально подобранного линейного функционала

$$\left\{ \bar{G}^{(0)} : S(\bar{G}^{(0)}) = \max_{G_i \in \Omega} S(\bar{G}) = c \right\} = \left\{ \bar{G}^{(0)} : J(\bar{G}^{(0)}) = \max_{G_i \in \Omega} J(\bar{G}) = \max_{G_i \in \Omega} \left[\int_{U^{(N)}} A(u)\bar{G}(du) - c \int_{U^{(N)}} B(u)\bar{G}(du) \right] = 0 \right\}.$$

Таким образом, исследование можно свести к более простому линейному случаю. Однако, исследуя линейный функционал, нельзя получить функцию, на которой достигается экстремум дробно-линейного функционала, поскольку, как правило, исследователю неизвестно значение максимума c . Поэтому определяют только структуру распределения, на котором достигается экстремум линейного функционала.

Приведем здесь некоторые результаты.

Теорема [10]. Пусть Ω множество допустимых вероятностных распределений содержит вырожденные распределения. Если существует максимум дробно-линейного функционала (1) по множеству Ω , то он достигается на вырожденных распределениях.

Эта теорема позволяет утверждать, что если множеству допустимых стратегий управления принадлежат все вырожденные стратегии, то введение рандомизации не улучшает качества управления. Кроме того, задача поиска максимума $S(\bar{G})$ по функциональному пространству Ω сводится к задаче поиска максимума функции многих переменных, так как

$$\max_{\bar{G} \in \Omega} S(\bar{G}) = \max_{(u_i \in U_i, i \in E)} \frac{A(u_1, u_2, \dots, u_N)}{B(u_1, u_2, \dots, u_N)}.$$

Для случая, когда в множестве, по которому берется экстремум, нет детерминированных стратегий, характер экстремальной функции определяет следующая теорема (сформулируем ее для одномерного случая).

Теорема [15]. Если существует экстремум дробно-линейного функционала

$$S(G) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} A(u)G(du)}{\int_{-\infty}^{+\infty} B(u)G(du)}$$

по множеству распределений $G(u)$, удовлетворяющих условиям

$G_1(u) \leq G(u) \leq G_2(u)$, то он достигается на распределении, которое либо совпадает с границами, либо постоянно, либо имеет скачок.

В частности, справедлива теорема.

Теорема [16]. Если существует экстремум дробно-линейного функционала по множеству функций распределения $G \in \Omega(n, \bar{y}, \bar{\pi})$, которые в заданных точках $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ принимают заданные значения, $G(y_i) = \pi_i$, то он достигается на распределениях, которые имеют одну точку роста в каждом интервале $[y_i, y_{i+1})$.

Управление при неполной информации о характеристиках управляемого процесса

В практических задачах исходные данные, определяющие в модели полумарковское ядро, точно не известны, потому что они находятся на основе имеющейся статистической информации. Например, в задачах надежности необходимо знать распределения времен безотказной работы системы в целом или ее отдельных частей. А фактически по результатам статистических испытаний на надежность строятся оценки характеристик безотказности технической системы: эмпирическая функция распределения или доверительный интервал для распределения, точечные оценки значений функции распределения в отдельных точках, точечная оценка для математического ожидания, дисперсии и другие моменты более высокого порядка, доверительные интервалы для неизвестных параметров и характеристик. Аналогичные замечания можно сделать относительно характеристик, определяющих свойства моделей массового обслуживания: распределение интервалом между соседними моментами поступления требований в систему, распределение времени обслуживания.

В этой ситуации можно говорить, что исходные распределения принадлежат некоторому множеству распределений. Так как полумарковское ядро зависит от исходных распределений, то в силу этого обстоятельства нельзя однозначно определить исходный процесс, и, следовательно, имеем не один УППП при фиксированной стратегии, а множество возможных процессов, одним из которых мы должны управлять.

В описанной ситуации для решения задачи используется принцип максимина: для наихудшего случайного процесса из заданного множества определяется оптимальная стратегия управления [1, 15–18].

Математическая постановка задачи сводится к предположениям: для каждого состояния $i \in E$ множество решений U_i есть прямое произведение двух множеств $U_i^{(1)}, U_i^{(2)}$ и для любого состояния $i \in E$ имеем $u = (u_1, u_2), u_k \in U_i^{(k)}, k = 1, 2$; стратегия в состоянии i задается совместными распределениями $G_i(A_1, A_2)$. Задача оптимизации сводится к поиску условных распределений (в случае зависимого характера принятия решений) и поиску безусловных распределений (в случае независимого характера принятия решений), на которых достигается максимин целевого функционала.

Если решения принимаются независимо, то $G_i(A_1, A_2) = G_i^{(1)}(A_1)G_i^{(2)}(A_2)$, а математическая задача сводится к поиску максимина и определению распределений, на которых он достигается, т.е.

$$\max_{G_i^{(1)} \in \Omega_i^{(1)}} \min_{G_i^{(2)} \in \Omega_i^{(2)}} S(G_i^{(1)}, G_i^{(2)}, i \in E) = S(F_i^{(1)}, F_i^{(2)}, i \in E).$$

Функции $F_i^{(1)}, i \in E$ определяют максиминную стратегию. Если в условиях сформулированной неопределенности принять эту стратегию управления, то гарантировано получение эффективности величины $S(F_i^{(1)}, F_i^{(2)}, i \in E)$, т.е. в реальной ситуации эффективность не может быть меньше. Если же отказаться от максиминной стратегии, то эффективность управления может быть меньше указанной величины.

При последовательном решении задачи поиска максимина для исследования внутреннего экстремума могут быть использованы приведенные выше теоремы о структуре экстремальных распределений. Однако при исследовании внешнего экстремума их использовать нельзя, поскольку меняется структура функционала, для которого определяется внешний экстремум. В [16] формулируются достаточные условия независимости экстремального распределения для внутреннего экстремума от распределений, по которым берется внутренний экстремум.

Теорема [16]. Если множество распределений, по которому берется внутренний экстремум, имеет мажорирующее распределение, функция $A(u_1, u_2)$ не возрастает, функция $B(u_1, u_2)$ не убывает по u_2 при любом u_1 , тогда

$$I(G, F) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} A(u_1, u_2)G(du_1)F(du_2)}{\int_{-\infty}^{+\infty} B(u_1, u_2)G(du_1)F(du_2)} \leq I(G, F^*).$$

Если независимо от распределения G внутренний экстремум достигается на мажорирующем распределении, то внешний экстремум определяется для дробно-линейного функционала, следовательно, работают сформулированные выше теоремы.

Заключение

Таким образом, процессы с конечным множеством состояний, характерные для задач выбора оптимальной стратегии технического обслуживания, сводятся к задаче оптимизации целевого функционала.

Список литературы

1. Барлоу, Р. Математическая теория надежности : пер. с англ. / Р. Барлоу, Ф. Прошан ; под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Советское радио, 1969. – 488 с.
2. Барзилович, Е. Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов. – М. : Советское радио, 1971. – 272 с.
3. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание (математический подход) / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М. : Радио и связь, 1988. – 392 с.
4. Герцбах, И. Теория надежности (с приложениями к профилактическому обслуживанию) / И. Герцбах. – М. : Нефть и газ (Изд-во РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина), 2003. – 263 с.
5. Каштанов, В. А. Теория надежности сложных систем : учеб. пособие / В. А. Каштанов, А. И. Медведев. – М. : Физматлит, 2010. – 608 с.
6. Каштанов, В. А. Общие принципы постановки и решения проблемы технического обслуживания сложных систем / В. А. Каштанов // Надежность. – 2002. – № 2. – С. 47–56.
7. Королюк, В. С. ПМП и их приложения / В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. – Киев : Наукова думка, 1982. – 236 с.
8. Сильвестров, Д. С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний / Д. С. Сильвестров. – М. : Советское радио, 1980. – 272 с.
9. Королюк, В. С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. – Киев : Наукова думка, 1982. – 236 с.
10. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, Ю. К. Беляев, В. А. Каштанов [и др.] ; под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Радио и связь, 1983. – 376 с.
11. Джевэлл, В. С. Управляемые полумарковские процессы / В. С. Джевэлл // Кибернетический сборник. – М. : Мир, 1967. – Вып. 4. – 162 с.
12. Каштанов, В. А. Об одном классе оптимальных дискретных управлений ПМП / В. А. Каштанов // Некоторые теоретические и прикладные вопросы теории вероятностей : тр. МИЭМ. – М., 1975. – Вып. 44. – С. 251–258.

13. Майн, Х. Марковские процессы принятия решений / Х. Майн, С. Осаки. – М. : Физматгиз, 1977. – 176 с.
14. Kashtanov, V. A. Discrete distributions in control problems (Дискретные распределения в задачах управления) // Probabilistic methods in discrete mathematics : Proceedings of the Fourth International Petrozavodsk Conference. – VSP, Utrecht, The Netherlands, 1997. – P. 267–274.
15. Барзилович, Е. Ю. О минимаксных критериях в задачах надежности / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов, И. Н. Коваленко // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1971. – № 3. – С. 367–373.
16. Барзилович, Е. Ю. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов. – М. : Советское радио, 1975. – 136 с.
17. Карманов, А. В. Исследование управляемых конечных марковских цепей с неполной информацией. Минимаксный подход / А. В. Карманов. – М. : Физматлит, 2002. – 176 с.
18. Голодников, А. Н. Определение оптимального периода предупредительной замены на основе информации о математическом ожидании и дисперсии времени безотказной работы системы / А. Н. Голодников, Л. С. Стойкова // Известия АН УССР. Кибернетика. – 1978. – № 3. – С. 67–74.

УДК 621.396.6

Каштанов, В. А.

Стратегия технического обслуживания на основе полумарковских процессов с конечным множеством состояний / В. А. Каштанов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 41–46.

Каштанов Виктор Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра высшей математики,
Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики» («МИЭМ» НИУ ВШЭ)
109028, г. Москва, Б.Трехсвятительский пер., 3.
(495) 916-88-13
E-mail: vakashtanov@hse.ru

Аннотация. Исследуются управляемые полумарковские процессы с конечным множеством состояний, характерные для задач выбора оптимальной стратегии технического обслуживания (управляемые модели надежности, задачи управления некоторым случайным процессом, системы массового обслуживания и др.), которые сводятся к задаче оптимизации целевого функционала. Проводится поиск оптимальной стратегии управления.

Ключевые слова: управление, процесс, модель, надежность, система, массовое обслуживание, целевой функционал.

V. Kashtanov

doctor of technical science, professor,
chair of higher mathematics,
MIEM NIU VSE
109028, Moscow, Large Trekhsvyatitelskiy, 3.
(495) 916-88-13
E-mail: vakashtanov@hse.ru

Abstract. Managed polumarkovskie processes are investigated with the final set of conditions specific to the tasks of identifying the optimal strategies of maintenance (managed reliability models, some management tasks in a random process, queueing systems, etc.), which are confined to the task of optimizing the target functionality. Searches for the optimum management strategy.

Key words: management, process model, reliability, system, massive room, target functionality.

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОНИКИ

А. А. Авакян, А. Г. Дмитриенко

Первичным функциональным элементом электроники является схмотехнический элемент (резистор, конденсатор, индуктивность). Структура схмотехнического элемента является достаточно сложной системой, состоящей из внутренних элементов, которыми в подавляющем большинстве являются такие элементы, как проводники конечного объема в некоторой объемной диэлектрической среде. В частности, все схмотехнические элементы в технологии КМОП выполняются в кристалле кремния путем создания проводников в оксиде кремния посредством светолитографии со схмотехнического шаблона.

В описанных выше первичных элементах электроники возможны только два вида отказов:

- разрыв в элементарном, достаточно малом, объеме проводника;
- пробой диэлектрика в некотором достаточно малом объеме.

Тогда физическая модель отказа схмотехнического элемента может быть представлена в виде следующего процесса. Полный обрыв проводника или пробой в диэлектрической среде возникает только после некоторого накопления элементарных обрывов или пробоев, приводящих к лавинообразному (практически мгновенному) процессу обрыва всего проводника или пробоя диэлектрика. Причинами локальных обрывов в проводнике и пробоев в диэлектрике могут быть либо отклонение от точного технологического процесса производства схмотехнического элемента, либо старение структуры. Поскольку как первый, так и второй процессы случайны, то и процесс отказов схмотехнических элементов будет также случайным.

На основании рассмотренной физической модели можно создать следующую математическую модель отказа схмотехнического элемента. Поскольку эта модель будет также стохастической, то математическая модель отказа будет иметь вид закона распределения отказов схмотехнического элемента.

Событие, заключающееся в элементарной деградации кристалла в области схмотехнического элемента, возникающее в случайные моменты времени, обозначим через E_i . При каждом событии E_i возникает случайная величина деградации $\xi_i(t)$. Примем за период наблюдения за состоянием кристалла один час. Сделаем предположение, что за период одного часа не может произойти более одного события E_i . Согласно справочным данным, средний период между отказами схмотехнического элемента составляет сотни миллиардов и более часов. Следовательно, вероятность возникновения более одного события E_i за один час можно принять равной нулю. Вероятность того, что в каком-нибудь из часов наблюдений (обозначим этот час через момент t) возникнет событие E_i , будет равна произвольной величине p , а вероятность отсутствия события E_i в этот момент равна $q = 1 - p$. При этом имеет место соотношение ($0 \leq p \leq 1$). Описанная выше распределенная случайная величина деградации $\xi_i(t)$ называется бинарным законом распределения, который имеет следующее математическое выражение:

$$\xi_i = \begin{cases} 1 & \text{– если событие } E_i \text{ имело место в } i\text{-м повторении} \\ & \text{наблюдения (эксперимента) и возникла случайная} \\ & \text{величина } x_i \text{ (соответствующая вероятность равна } P\text{);} \\ 0 & \text{– если событие } E_i \text{ не произошло в } i\text{-м повторении} \\ & \text{наблюдения (эксперимента) и случайная величина } x_i \\ & \text{не возникла (соответствующая вероятность равна } q = 1 - P\text{).} \end{cases} \quad (1)$$

Введем понятие случайного события E_r , заключающегося в том, что при n повторений наблюдения возникнет ровно r случайных событий E_i , которые приводят к отказу схмотехниче-

ского элемента. Этот отказ происходит в случайный момент t_r , когда возникает последний из r случайных событий E_i . Случайную величину – отказ схемотехнического элемента – обозначим $\xi_r(t_r)$. Вероятность появления случайной величины $\xi_r(t_r)$ при независимых n испытаниях, одним из множества возможных способов равна вероятности появления события E_i в r испытаниях и не появления события E_i в $n-r$ испытаниях. По теореме умножения эта вероятность равна

$$p^r * q^{n-r}. \quad (2)$$

Число всевозможных способов появления случайной величины $\xi_r(t_r)$ при n испытаниях равно C_n^r . Тогда вероятность появления отказа схемотехнического элемента равна

$$P_n(r) = P(\xi_r(t_r) = r) = C_n^r P^r q^{n-r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} P^r q^{n-r}, \quad (3)$$

где t_r есть непрерывная случайная величина – наработка схемотехнического элемента до отказа; $r = 1, 2, 3, \dots, n$.

Закон распределения (3) называется биномиальным законом распределения вероятностей [1, 2], так как члены ряда в формуле (3) являются членами ряда бинома Ньютона, имеющего следующий вид:

$$(p + q r)^n. \quad (4)$$

Определим математическое ожидание и вероятное отклонение случайных величин $\xi_r(t_r)$ по известным формулам [1, 2] и законам распределения вероятностей случайных величин $\xi_i(t)$ (1) и $\xi_r(t_r)$ (3):

$$M[\xi_i(t)] = p, D[\xi_i(t)] = \sqrt{pq}; \quad (5)$$

$$M[\xi_r(t)] = np, D[\xi_r(t)] = \sqrt{npq}.$$

Интегральная (центральная) предельная теорема Муавра – Лапласа гласит: если r есть число наступления событий E_i в n независимых испытаниях, в каждом из которых вероятность этого события равна p , причем $0 < p < 1$, то равномерно относительно a и b ($-\infty \leq a \leq b \leq +\infty$) при $n \rightarrow \infty$ имеет место соотношение:

$$P < a \leq \frac{r - np}{\sqrt{npq}} \leq b > \rightarrow \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}. \quad (6)$$

Сходимость биномиального закона распределения к нормальному показана в [1, с. 226], где приведены совместные графики:

- нормированного биномиального для n , равного 5 и 30, при $P = 0,3$;
- нормального распределения.

Из (6) видно, что при количестве накоплений n элементарных изменений, стремящихся к бесконечности, в проводнике или диэлектрике будет возникать лавинообразный пробой во всем диэлектрике или разрыв во всем проводнике, что приведет к отказу схемотехнического электронного элемента. При этом биномиальный закон распределения случайной величины $\xi(t)$ стремится к нормальному закону. Как видно из (5), математическое ожидание и вероятное отклонение этой случайной величины стремятся также к бесконечности, что не является адекватным физическому процессу отказов схемотехнического электронного элемента. Адекватность математической модели реальному физическому процессу может быть достигнута следующим образом.

Схемотехнический электронный элемент, например транзистор, относительно таких его элементов, как области проводников и диэлектриков, является достаточно сложной системой. Однородные области, относительно которых при возникновении события E_i возникает случайная величина $\xi(t)$, в разных элементах системы, какой является схемотехнический элемент, имеют различные вероятности бинарных событий p , (обозначим их через p_j), а также различные (достаточно большие, но конечные) значения величин (обозначим их через n_j), а случайную величину,

возникающую при этом, обозначим через $\xi_j(t)$. Соответственно математические ожидания и вероятные отклонения этих случайных величин будут равны

$$M[\xi_j(t)] = n_j p_j, D[\xi_j(t)] = \sqrt{n_j p_j q_j}.$$

Отказы схемотехнических элементов будут происходить при различных комбинациях возникновения случайных величин $\xi_j(t)$, но поскольку распределение вероятностей каждой из них будет близко к нормальному, то согласно теореме Ляпунова [1, 2] различные комбинации из сумм этих случайных величин будут иметь нормальное распределение вероятностей с некоторыми интегральными параметрами T и σ . Поскольку в отрицательной области временной оси отказы не существуют, то распределение вероятностей отказов схемотехнических элементов электроники будет подчинено усеченно-нормальному закону:

$$f(t) = \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-T}{\sigma}\right)^2}, \quad (7)$$

где $t > 0$.

Величина C является коэффициентом усечения и определяется из условия, что интеграл от плотности (7) в пределах от 0 до ∞ равен единице, т.е.:

$$C = \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-T}{\sigma}\right)^2} dt}. \quad (8)$$

Чтобы подтвердить адекватность рассмотренного гипотетического процесса реальному физическому процессу возникновения отказов элементов электроники, оценим порядок соотношения между параметрами законов распределения отказов систем и элементов электроники. Распределение отказов электронного элемента и устройства подчинены экспоненциальному закону [3–7], а вероятности отказа элемента Q_3 и устройства КБО Q_y , состоящего из N_y элементов, описываются следующими выражениями:

$$Q_3 = 1 - e^{-\lambda_3 t}, \quad (9)$$

$$Q_E = 1 - e^{-N_y \lambda_3 t}. \quad (10)$$

Оценим величину вероятности безотказной работы схемотехнических элементов электронных систем исходя из вероятности безотказной работы электронного устройства. Как правило, электронные устройства состоят из плат, которые, в свою очередь, состоят из микросхем и монтажных элементов. Современные микросхемы, выполненные на монокристаллах по технологии КМОП, имеют в своем составе сотни тысяч и более схемотехнических электронных элементов (транзисторов, конденсаторов, резисторов и т.п.). Общее количество схемотехнических элементов в устройствах электроники N_y достигает десятков миллионов и более единиц. В то же время практика показывает, что вероятность отказа на час наработки (налета) устройств электроники $Q_y(1ч)$ (эта величина численно равна интенсивности отказов) имеет порядок 10^{-3} – 10^{-4} отказов в час. Сделаем следующее упрощение в структуре устройств электроники, которое не отразится на оценке. Допустим, что вероятности отказов всех схемотехнических элементов электронного устройства одинаковы, а их количество максимально и равно 10^6 . Допустим, что вероятность отказа электронного устройства минимальна и равна 10^{-4} отказа за час наработки (налета) [4–7]. Очевидно, что эти допущения приведут к максимальной оценке вероятности отказа усредненного схемотехнического элемента Q_3 . Формула, связывающая Q_3 и Q_y , имеет следующий вид:

$$Q_3(1) = 1 - e^{-\frac{Ln(1-Q_y(1))}{N_y}}. \quad (11)$$

Подставив в (11) $Q_y(1) = 10^{-4}$, $N_y = 10^6$, получим $Q_3(1) = 1,0005 \cdot 10^{-10}$. Следовательно, значения вероятностей отказов схемотехнических элементов устройств электроники за один час нара-

ботки не превышают 10^{-10} отказа на 1 ч. Заметим, что согласно формуле (7), рассчитанная вероятность отказа на 1 ч наработки (налета) является оценкой плотности вероятности в точке 0,5 ч на интервале 1 ч, т.е.:

$$Q_3(1_{\text{час}}) = f(0,5) = \frac{F(1_{\text{час}})}{1_{\text{час}}} = \lambda_3 = 10^{-10} \text{ отказов за 1 ч.} \quad (12)$$

На основании (7) и (12) запишем следующее соотношение:

$$\frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{0,5-T}{\sigma}\right)^2} = 10^{-10}. \quad (13)$$

Из (8) и (13) видно, что система уравнений относительно C , T и σ неразрешима, поскольку в двух уравнениях три неизвестных параметра. Для разрешения этой системы сделаем следующее допущение, которое хорошо согласуется со справочными данными по отказам схмотехнических элементов электроники и впоследствии будет обосновано теоретически:

$$T = \frac{1}{Q_3} = \frac{1}{f(0,5)} = 10^{10} \text{ ч.} \quad (14)$$

Подставив это значение в выражения (8) и (13), получим:

$$C = 1,000000003 = 1, \sigma = 0,5869 \cdot 10^{10}. \quad (15)$$

Анализируя этот результат, можно заключить, что при таких больших математических ожиданиях нормальное распределение практически не усечено и вероятное отклонение σ составляет около 60 % от математического ожидания.

Формула интенсивности отказов $\lambda(t)$ имеет следующий вид [2]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)}. \quad (16)$$

Как видно из формулы (16), интенсивность отказов является плотностью вероятности возникновения отказов относительно множества исправных устройств, а не всего множества функционирующих устройств.

Подставив в формулу (7) значения T из (14), C и σ из (15), запишем следующие формулы для расчета плотности вероятностей усредненного схмотехнического элемента электронных систем при определенных выше параметрах усеченно-нормального закона распределения:

$$f(t) = \frac{1}{0,59 \cdot 10^{10} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-10^{10}}{0,59 \cdot 10^{10}}\right)^2}. \quad (17)$$

Подставив в формулу (16) T из (14), C и σ из (15), запишем следующие формулы для расчета интенсивности отказов усредненного схмотехнического элемента электронных систем при определенных выше параметрах усеченно-нормального закона распределения:

$$\lambda(t) = \frac{1}{0,59 \cdot 10^{10} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-10^{10}}{0,59 \cdot 10^{10}}\right)^2} \cdot \left(1 - \frac{0,59 \cdot 10^{10} \sqrt{2\pi}}{\int_0^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-10^{10}}{0,59 \cdot 10^{10}}\right)^2} dt} \right). \quad (18)$$

Рассчитанные по формулам (17) и (18) значения $f(t)$ и $\lambda(t)$ для значений наработки (налета) областей: глубокого морального старения электронной аппаратуры от 0 до 10^6 ч (более 100 лет); период физического старения аппаратуры (массовых отказов) от $0,510^{10}$ до $1,510^{10}$ ч, сведены в табл. 1 и отображены на графиках рис. 1.

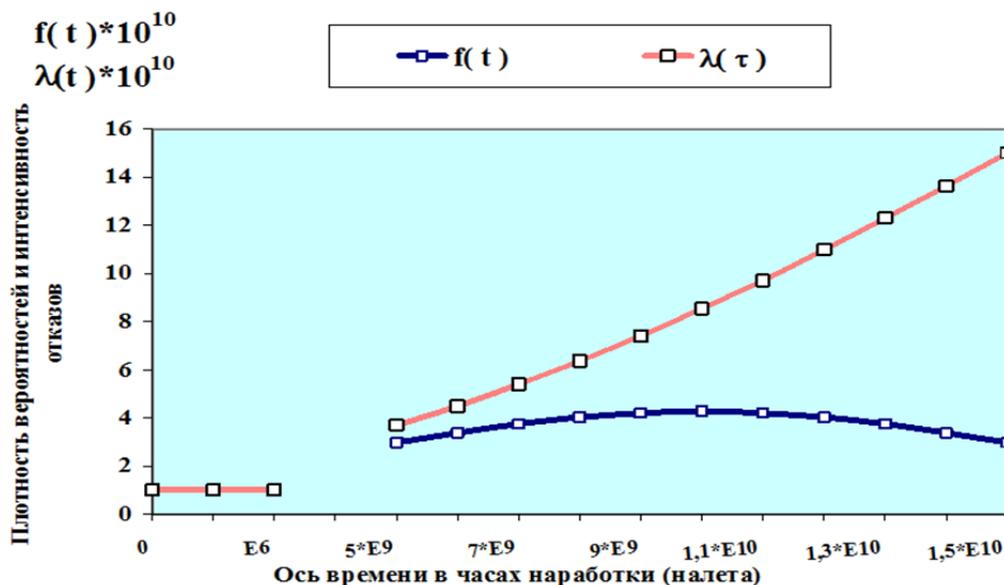
Таблица 1

 Результаты расчета $f(t)$, $\lambda(t)$ по формулам (17) и (18)

Параметры надежности	Время (наработка в час)													
	0	10^5	10^6	$0,5 \cdot 10^{10}$	$0,6 \cdot 10^{10}$	$0,7 \cdot 10^{10}$	$0,8 \cdot 10^{10}$	$0,9 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{10}$
Нарработка (налет) в часах, отображенная на рис. 1	0	10^5	10^6	$5 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{10}$
Значения плотности распределения вероятностей отказов $f(t)$	10^{-10}	10^{-10}	$1,0003 \cdot 10^{-10}$	$2,97 \cdot 10^{-10}$	$3,38 \cdot 10^{-10}$	$3,75 \cdot 10^{-10}$	$4,03 \cdot 10^{-10}$	$4,20 \cdot 10^{-10}$	$4,27 \cdot 10^{-10}$	$4,20 \cdot 10^{-10}$	$4,03 \cdot 10^{-10}$	$3,75 \cdot 10^{-10}$	$3,38 \cdot 10^{-10}$	$2,97 \cdot 10^{-10}$
Значения интенсивности отказов $\lambda(t)$	10^{-10}	10^{-10}	$1,0003 \cdot 10^{-10}$	$3,70 \cdot 10^{-10}$	$4,49 \cdot 10^{-10}$	$5,40 \cdot 10^{-10}$	$6,37 \cdot 10^{-10}$	$7,41 \cdot 10^{-10}$	$4,27 \cdot 10^{-10}$	$8,34 \cdot 10^{-10}$	$9,70 \cdot 10^{-10}$	$11,00 \cdot 10^{-10}$	$13,60 \cdot 10^{-10}$	$15,00 \cdot 10^{-10}$

Из таблицы и графиков видно, что на участке до одного миллиона часов (сто лет) плотность распределения вероятностей и интенсивность отказов равны и постоянны. В области старения аппаратуры наблюдается резкий рост интенсивности отказов (в 15 раз) при максимуме возрастания плотности распределения вероятностей отказов в 4,27 раза.

На рис. 1 представлены графики изменения плотности распределения вероятностей отказов $f(t)$ и значения интенсивности отказов $l(t)$.


 Рис. 1. Плотность распределения вероятностей возникновения отказов $f(t)$ и интенсивности отказов $l(t)$

Таким образом, описанная выше физическая модель отказа схмотехнического элемента с применением центральной предельной теоремы позволяет утверждать, что распределение отказов схмотехнического элемента подчиняется усеченно-нормальному закону и что на участке до одного миллиона часов (сто лет) плотность распределения вероятностей и интенсивность отказов

равны и постоянны. Следовательно, эксплуатация схмотехнических элементов КБО практически осуществляется на стационарном участке интенсивности отказов [8].

Список литературы

1. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер ; под ред. А. Н. Колмогорова. – М. : Мир, 1975. – 648 с.
2. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – М. : Наука, 1988. – 451 с.
3. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
4. Авакян, А. А. Модели функциональных и несовместных отказов комплексов бортового оборудования и генерации на ЭВМ характеристик отказобезопасности / А. А. Авакян, О. Н. Реутов // Авиакосмическая техника и технология. – 1996. – № 2. – С. 265–269.
5. Авакян, А. А. Методика № 564-91-VIII «Автоматизированного расчетного анализа безотказности и оценка отказобезопасности сложных комплексов бортового оборудования» / А. А. Авакян, О. Н. Реутов, В. С. Никифоров. – Жуковский : Изд-во НИИ АО, 1991.
6. Авакян, А. А. Анализ надежности многофункциональных систем на стадиях проектирования и сертификации / А. А. Авакян, О. Н. Реутов // Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем : тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 1993. – С. 253–258.
7. Авакян, А. А. Отчет № 78-02-XVI «Оценка и анализ эксплуатационно-экономических характеристик и необходимого количества обменного фонда комплекса АРИА-200М для обеспечения регулярности полетов самолета БЕ-200ЧС» / А. А. Авакян, Р. Д. Искандаров, М. В. Копненко. – Жуковский : Изд-во ОАО НИИАО, 2008. – 263 с.
8. Авакян, А. А. Создание отказоустойчивых систем электроники на основе управляющей избыточности / А. А. Авакян, Н. К. Юрков // Надежность и качество – 2011 : труды междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 2. – С. 369–375.

УДК 519.24.001:512,643,5

Авакян, А. А.

Закон распределения отказов элементов и систем электроники / А. А. Авакян, А. Г. Дмитриенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 47–53.

Авакян Александр Анушаванович

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
ОАО «НИИ авиационного оборудования»
140180, г. Жуковский Московской области,
ул. Туполева, 18.
(495) 556-23-22
E-mail: info@niifi.ru

A. Avakyan

doctor of technical science, the main scientific worker
Institute of Aircraft Equipment
140180, Zhukovskiy Moskovskoy region,
Tupolev street, 18.
(495) 556-23-22
E-mail: info@niifi.ru

Дмитриенко Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук, генеральный директор,
ОАО «Научно-исследовательский институт
физических измерений»,
440026, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10.
(8412) 56-55-63
E-mail: info@niifi.ru

A. Dmitrienko

candidate of technical sciences,
director general of public corporation
«Scientific-research Institute
of physical measurements»
440026, Penza, Volodarskogo street, 8/10.
(8412) 56-55-63
E-mail: info@niifi.ru

Аннотация. Рассмотрена структура схмотехнического элемента электроники. Показано, что в основе физической модели отказа схмотехнического элемента лежат бинарные события двух видов: разрыв проводника и пробой диэлектрика. Физическая модель отказа формализована в виде бинарного и биномиального законов распределения отказов. Посредством предельной теоремы Ляпунова доказано, что закон распределения отказов элементов и систем электроники является нормальным. Получены оценки математического ожидания и вероятного отклонения отказов схмотехнических элементов электроники.

Abstract. A structure of an electronic circuit element is considered. It is shown that the physical failure model for a circuit element is based on two types of binary events: a conductor break and a dielectric breakdown. The physical failure model is formalized in the form of the binary failure distribution law and the binomial failure distribution law. It is proved with the Lyapunov limit theorem that the failure distribution law for electronics components and systems is normal. Estimates of expectations and probable deviation of failures are obtained for electronic circuit elements.

Ключевые слова: электроника, элемент, вероятность, математическое ожидание, дисперсия, случайная величина, закон распределения, нормальный закон, бинарный закон, биномиальный закон, экспоненциальный закон.

Key words: electronics, element, probability, expectation, dispersion, random quantity, distribution law, normal law, binary law, binomial law, exponential law.

К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ НАРАБОТКИ ДО КРИТИЧЕСКОГО ОТКАЗА ТЕХНОГЕННО-ОПАСНОГО ОБЪЕКТА

Г. С. Садыхов, В. П. Савченко

Системный анализ безопасности ограничивается выявлением факторов и обстоятельств, влияющих на появление аварий, катастроф, чрезвычайных ситуаций, других нештатных ситуаций, а также разработкой предупредительных мероприятий, снижающих вероятность их появления.

В задаче распознавания состояния безопасности сложных технических систем (СТС) наиболее точное решение может быть получено, если оно принимается на основе достаточного количества исходных данных. В большинстве практических задач все многообразие состояний СТС может быть сведено к нескольким классам, число которых невелико ввиду ограниченного набора действий, принимаемых в том или другом состоянии. В простейшем случае речь идет о двух состояниях СТС (опасное или неопасное, устойчивое или неустойчивое и т.д.). В подобных задачах проводится измерение каких-либо физических параметров, характеризующих состояние СТС, и классификация состояний СТС осуществляется по полученным значениям [1].

Пусть $(\tau, \tau + l]$ – заданный опасный интервал времени эксплуатации техногенно-опасного объекта. Под опасным интервалом будем подразумевать такой период штатной эксплуатации, на котором возможный отказ объекта носит критический характер, приводящий к авариям и катастрофам. Тогда наработкой объекта до критического отказа служит величина

$$\zeta_l(\tau) = \begin{cases} \zeta & \text{при } \zeta \in (\tau, \tau + l); \\ \tau + l & \text{при } \zeta \geq \tau + l, \end{cases} \quad (1)$$

где ζ – наработка до критического отказа.

Применение известных показателей, таких как средняя наработка до отказа и гамма-процентный ресурс для количественной оценки наработки до критического отказа, не совсем корректно, так как найденные значения этих показателей могут выходить за пределы опасного интервала.

В связи с этим определим среднюю наработку до критического отказа по формуле

$$\rho_l(\tau) = \langle \zeta_l(\tau) \rangle, \quad (2)$$

где $\langle \ \rangle$ – символ математического ожидания величины (1).

Перечислим следующие оценки показателя $\rho_l(\tau)$, установленные нами:

1. Справедлива следующая двухсторонняя оценка показателя (2): $\tau < \rho_l(\tau) \leq \tau + l$, причем знак равенства в правой части достигается тогда и только тогда, когда $P(\tau) = P(\tau + l)$, здесь $P(\cdot)$ – вероятность безотказной работы объекта в течение времени, указанного внутри скобок.

2. Для любого момента времени $\tau > \tau_0$ имеет место следующая оценка: $\rho_l(\tau) > \rho_l(\tau_0)$.

3. Точечной оценкой показателя (2) служит следующая величина:

$$\hat{\rho}_l^{(n)}(\tau) = \frac{1}{n-k} \left(\sum_{i=1}^m z_i + (n-k-m)(\tau+l) \right), \quad (3)$$

где k – число отказавших объектов в течение времени τ из всех наблюдаемых (испытанных) однотипных объектов в количестве n ($k \neq n$); z_i – наработка до критического отказа i -го объекта из числа m всех отказавших на интервале $(\tau, \tau + l)$.

4. Справедлива следующая формула:

$$\langle \rho_l^{(n)}(\tau) \rangle = \tau + K_n(\tau)r_l(\tau), \quad (4)$$

где $r_l(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_{\tau}^{\tau+l} P(x)dx$, $K_n(\tau) = 1 - (1 - P(\tau))^n$. Поскольку [2] $\rho_l(\tau) = \tau + r_l(\tau)$, то из (4) следует, что точечная оценка (3) смещенная. Для ликвидации смещения вместо оценки (3) предлагается использовать оценку

$$\tilde{\rho}_l^{(n)}(\tau) = \tau + \tilde{r}_l^{(n)}(\tau), \quad (5)$$

где $\tilde{r}_l^{(n)}(\tau) = \frac{1}{K_n(\tau)(n-k)} \left(\sum_{i=1}^m (z_i - \tau) + (n-k-m)l \right)$.

Поскольку $\langle \tilde{r}_l^{(n)}(\tau) \rangle = r_l(\tau)$, то справедливо соотношение $\langle \tilde{\rho}_l^{(n)}(\tau) \rangle = \rho_l(\tau)$. Следовательно, оценка (5) не смещенная.

При малых объемах выборки уровень доверия к точечной оценке (5) крайне низок.

5. Нижней доверительной границей показателя $\rho_l(\tau)$ при доверительной вероятности p ($0 < p < 1$) служит следующая величина:

$$\underline{\rho}_l^{(n)}(\tau) = \tilde{\rho}_l^{(n)}(\tau) - \frac{l}{K_n(\tau)} \sqrt{\frac{-\ln(1-p)}{2(n-k)}}.$$

Таким образом, определен показатель средней наработки до критического отказа и установлены его оценки. Пусть задано время t , в течение которого необходимо провести некоторый эксперимент с однотипными системами с двумя противоположными исходами, например, «хорошо» или «плохо» в социальных системах; «отказ» или «безотказность» в технических системах и т.д. Требуется определить n_0 – минимальное количество однотипных систем для объективного проведения выборочного эксперимента.

В целях определения искомой величины n_0 воспользуемся терминологией, сложившейся в теории надежности при проведении испытаний на долговечность.

Пусть τ – наработка до отказа некоторой системы. Введем следующую величину:

$$\eta(t) = \begin{cases} \tau, & \text{если } \tau < t; \\ t, & \text{если нет отказа внутри интервала } (0, t). \end{cases}$$

Следовательно, величина $\eta(t)$ – безотказная наработка системы в течение времени t . Определим среднюю долю безотказной наработки (СДБН) по следующей формуле [3]:

$$J(t) = \left\langle \frac{\eta(t)}{t} \right\rangle, \quad (6)$$

где $\langle \rangle$ – символ математического ожидания.

Формула (6) позволяет записать точечную оценку показателя СДБН в виде

$$\hat{J}_n(t) = \frac{1}{nt} \left(\sum_{i=1}^k \tau_i + (n-k)t \right), \quad (7)$$

где n – количество однотипных систем, из которых k отказало в течение времени t ; τ_i – наработка до отказа i -й системы ($i = 1, 2, \dots, k$).

При малых объемах выборки степень доверия к точечной оценке показателя СДБН крайне низка, поэтому нами установлена следующая нижняя доверительная граница показателя СДБН при заданной доверительной вероятности p :

$$\underline{J}_n(t) = \hat{J}_n(t) - \sqrt{\frac{-\ln(1-p)}{2n}}. \quad (8)$$

Формула (3) позволяет определить минимальное количество однотипных систем, необходимое для проведения выборочного эксперимента.

$$\text{В самом деле, из (8) находим } n = \frac{-\ln(1-p)}{2(\hat{J}_n(t) - \underline{J}_n(t))^2}.$$

Откуда с учетом оценки $\hat{J}_n(t) \leq 1$, которая следует из (2), имеем [2, 3]

$$n \geq \frac{-\ln(1-p)}{2(1 - \underline{J}_n(t))^2}. \quad (9)$$

Следовательно, искомое минимальное количество однотипных систем, необходимое для проведения выборочного эксперимента определится как целая правая часть (9), т.е.

$$n_0 = \left\lceil \frac{-\ln(1-p)}{2(1 - \underline{J}_n(t))^2} \right\rceil, \quad (10)$$

где $\lceil \quad \rceil$ – символ целой части.

Из найденной формулы (10) видно, что:

1) если доверительная вероятность p стремится к 1, то объем выборки n_0 увеличивается и, напротив, если p уменьшается ($p \rightarrow 0$), то число систем n_0 для проведения выборочного эксперимента также уменьшается;

2) если значение нижней доверительной границы $\underline{J}_n(t)$ стремится к 1, то объем выборки увеличивается и, напротив, если значение $\underline{J}_n(t)$ уменьшается, то объем выборки также становится меньше.

Очевидно, что оба вывода хорошо согласуются с логикой проведения выборочного эксперимента. Полученная формула (10) для расчета минимального объема выборки для проведения выборочного эксперимента может быть использована и при планировании и проведении других видов выборочных экспериментов в различных областях науки.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество – 2011 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 104–106.
2. Садыхов, Г. С. Показатель безопасной наработки на заданном периоде времени эксплуатации техногенно-опасных объектов, его расчет и оценки / Г. С. Садыхов, О. В. Некрасова, А. Ферас // Фундаментальные проблемы системной безопасности : сб. ст. – М. : Вузовская книга, 2009. – Вып. 2. – С. 53–56.
3. Садыхов, Г. С. Теоретические основы методов расчета надежности изделий, изложенных в государственном стандарте ГОСТ 27.505-86 / Г. С. Садыхов // Надежность и контроль качества. – 1996. – № 2. – С. 3–9.

УДК 519.284.681.51;718.2

Садыхов, Г. С.

К проблеме оценки средней наработки до критического отказа техногенно-опасного объекта / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. С. 54–57.

Садыхов Гулам Садыхович

доктор технических наук, профессор,
кафедра математики,
Московский государственный
технический университет им. Н. Баумана
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5.
E-mail: gsadykhov@gmail.com

Савченко Владимир Петрович

доктор технических наук, профессор,
генеральный директор,
ОАО «Радиотехнический институт
им. академика А. Л. Минца»,
127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д.10, стр. 1.
(495) 614-04-51
E-mail: savchenko@rti-mints.ru

Аннотация. Для техногенно-опасного объекта определен показатель «средняя наработка до критического отказа» и установлены его оценки. На основе сравнения характеристик надежности отказавших и неотказавших систем в течение заданного времени определяется минимальное количество систем, необходимое для проведения выборочного эксперимента.

Ключевые слова: отказ, вероятность, наработка до критического отказа, точечная оценка, нижняя доверительная граница, выборка, средний ресурс.

G. Sadyhov

Doctor of Technical Science, professor,
department of Mathematics, MGTU im. N. Baumana
105005, Moscow, 2 Baumansky street, 5.
E-mail: gsadykhov@gmail.com

V. Savchenko

Doctor of Technical Science, professor,
General Director,
Radiotekhnicheskiy institute of the name
of the academician A. L. Mints
127083, Moscow, 8 March street, 10, p. 1.
E-mail: savchenko@rti-mints.ru

Abstract. For technogenic and dangerous object the indicator an average operating time to critical refusal is defined and its estimates are established. On the basis of comparison of characteristics of reliability of the refused and not refused systems during set time the minimum quantity of systems necessary for carrying out sampling experiment is defined

Key words: Refusal, probability, operating time to critical refusal, dot assessment, lower confidential bound, selection, average resource.

ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОСВЕННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В. К. Дедков

Постановка задачи

Современный уровень развития техники значительно повысил уровень интеграции объектов, повысил требования к надежности сложных технических систем (СТС), в том числе и к восстанавливаемым нестареющим объектам. Показателями надежности восстанавливаемых объектов служат характеристики **потоков отказов** $h(n)$, связанные причинно-следственными зависимостями с составляющими комплекса условий испытаний $\hat{\vartheta}(x, y, u)$ объектов прогноза. Для применения косвенных методов прогнозирования потоков отказов восстанавливаемых технических объектов необходимо непрерывные переменные комплекса условий испытаний (или эксплуатации) объекта $[\hat{u}(t), \hat{x}(t), \hat{y}(t), \hat{z}(t)]$ преобразовать в последовательности некоррелированных случайных величин $[\hat{u}_n, \hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{z}_n]$, зависящих от порядкового номера нагружения (n) объекта как от параметра. Такое преобразование осуществляется по «методу некоррелированных максимумов» [1].

При косвенном методе прогнозирования надежности условием отказа в одном акте нагружения объекта является соотношение $(\hat{u} > \hat{x})$, условием безотказной работы $(\hat{u} \leq \hat{x})$, где \hat{u} – случайная величина нагрузки, действующей на объект в n -м нагружении, \hat{x} – случайная величина сопротивляемости объекта действующей нагрузке.

Введем обозначения: $F_{\hat{u}}(x)$ – функция распределения случайной величины нагрузки в одноактном нагружении; $F_{\hat{x}}(x)$ – функция распределения сопротивляемости объекта действующей нагрузке до начала нагружений (эксплуатации); $F_{\hat{y}}(x)$ – функция распределения сопротивляемости объекта, введенного в эксплуатацию взамен отказавшего; $\hat{x}_i = \hat{x} [1 + b(i-1)^\alpha] - a(i-1)^\alpha$ – функция старения сопротивляемости объекта введенного в эксплуатацию до начала первого нагружения, a, b, α – параметры старения объекта при функционировании; $\hat{y}_n = \hat{y} [1 + b_x(n-1)^{\alpha_x}] - a_x(n-1)^{\alpha_x}$ – функция старения запасного объекта до момента n использования его взамен отказавшего, a_x, b_x, α_x – параметры старения запасного объекта при его хранении до начала применения.

Поток отказов называется **стационарным**, если вероятность появления того или иного числа отказов на отрезке времени, равном τ , зависит только от длины этого отрезка и не зависит от того, где именно на оси времени (последовательного числа нагружений n) находится этот отрезок.

Поток отказов называется **ординарным**, если вероятность появления двух или большего числа отказов на элементарном отрезке времени Δt (в одном нагружении) пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного отказа.

Поток называется потоком **без последствия**, если вероятность появления определенного числа отказов на некотором отрезке времени τ не зависит от чередования отказов, возникших до этого момента. Иными словами, условная вероятность наступления m отказов на интервале испытаний $[n, n + \Delta n]$, вычисленная при любом предположении о чередовании отказов до момента n , равна безусловной вероятности $P_m(\Delta n; n)$ того же события.

Поток, обладающий свойством стационарности, ординарности и отсутствием последствия, называется **простейшим** потоком.

Интегральное уравнение восстановления

В данном исследовании рассматриваются **одномерные** потоки отказов, обусловленные действием нагрузки определенной физической природы. Условие одномерности потока отказов однозначно определяет его ординарность. В теории потоков (восстановлений) [2] показано, что если поток простейший, т.е. обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствием последования, то параметр потока отказов численно равен **интенсивности отказа** $h(n) = \psi(n)$. Для асимптотически стационарных потоков справедливо аналогичное равенство

$$\lim_{n \rightarrow \infty} h(n) = \psi(n). \quad (1)$$

В дальнейшем будем пользоваться в основном лишь понятием интенсивности потока отказов, обозначив его через $h(n)$.

С учетом всех факторов, влияющих на вероятность отказа $P(\hat{u}_n > \hat{z}_n)$ объекта в n -м нагружении, получим следующее выражение для определения интенсивности потока отказов $h(n)$ [1]:

$$h(n) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\hat{u}}(x; x_n) \prod_{i=1}^{n-1} F_{\hat{u}}(x; x_i) \phi_{\hat{x}}(x) dx + \sum_{j=1}^{n-1} h(j) \int_{-\infty}^{\infty} R_{\hat{u}}(x; x_{n-j}) \prod_{i=1}^{n-j-i} F_{\hat{u}}(x; x_i) \phi_{\hat{y}}\left(\frac{x+A_j}{B_j}\right) \frac{1}{|B_j|} dx, \quad (2)$$

где

$$(\hat{x}: -\infty < x < \infty), (\hat{y}: -\infty < y < \infty), (\hat{u}: -\infty < u < \infty), [n=1(1)\infty];$$

$$F_{\hat{u}}(x; x_i) = F_{\hat{u}}\{x[1+b(i-1)^\alpha] - a(i-1)^\alpha\}, R_{\hat{u}}(x; x_i) = 1 - F_{\hat{u}}(x; x_i);$$

$$A_i = a_x(j-1)^{\alpha_x}; B_j = 1 + b_x(1-j)^{\alpha_x}, [i=1(1)n-1], [j=1(1)n-1].$$

Интенсивность потока отказов $h(n)$ представляет собой решетчатую функцию, определенную лишь при целочисленных значениях аргумента n .

Интегралы в выражении (2) отличаются один от другого, во-первых, количеством предыдущих нагружений до рассматриваемого момента времени (номера нагружения n), а, во-вторых, в общем случае, законами распределения сопротивляемостей объектов замены в момент установки их взамен отказавших, т.е. $\phi_{\hat{z}}(x) = \phi_{\hat{x}}(x)$ – в момент начала эксплуатации (прогнозирования)

и $\phi_{\hat{z}}(x) = \phi_{\hat{y}}\left(\frac{x+A_j}{B_j}\right) \frac{1}{|B_j|}$ – для момента возобновления эксплуатации после устранения отказа

в любом j -м восстановлении. Различия в аргументе n не затрагивают причин появления отказа и не влияют на вероятностные свойства и характер распределения случайной величины \hat{n} , т.е. не изменяют при прочих равных условиях ряд распределения $P_{\hat{n}}(n)$, чего нельзя сказать о плотностях распределения сопротивляемости объектов замены в моменты начала их функционирования. Исходный уровень сопротивляемости объектов, являясь одним из факторов, влияющих на появление отказа, непосредственно определяет характер распределения $P_{\hat{n}}(n)$ случайной величины \hat{n} . Поэтому, имея дело с объектами, обладающими различными в стохастическом смысле сопротивляемостями, мы имеем дело с различными случайными величинами наработок на отказ \hat{n}_j , а следовательно, и с различными при прочих условиях рядами распределения вероятностей отказов $P_{\hat{n}_j}(n)$. Обозначим соответствующие интегралы в выражении (2) как

$$P_{\hat{n}_0}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\hat{u}}(x; x_n) \prod_{i=1}^{n-1} F_{\hat{u}}(x; x_i) \phi_{\hat{x}}(x) dx, \quad (3)$$

$$P_{\bar{n}_j}(n-j) \stackrel{d}{=} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\bar{u}}(x; x_{n-j}) \prod_{i=1}^{n-j-i} F_{\bar{u}}(x; x_i) \phi_{\bar{y}} \left(\frac{x + A_j}{B_j} \right) \frac{dx}{|B_j|}, \quad (4)$$

где $P_{\bar{n}_0}(n)$ представляет собой вероятность отказа в n -м нагружении объекта, поставленного на эксплуатацию в начальный момент времени $t_0, (n_0)$, а $P_{\bar{n}_j}(n-j)$ – вероятность отказа в n -м нагружении объекта, функционирование которого началось после j -го нагружения для всех $[j = 1(1)n - 1]$.

Принимая во внимание аналогию между непрерывным временем безотказной работы объекта и числом n его успешных нагружений до отказа, $P_{\bar{n}_0}(n)$ можно рассматривать как дискретный аналог плотности распределения времени безотказной работы

$$\phi_{\bar{n}_0}(t) = \sum_n P_{\bar{n}_0}(n) \delta(t-n), \quad (5)$$

где $\delta(t-n)$ – дельта функция Дирака; t – текущее время.

С учетом (3) и (4) выражение (2) для определения интенсивности потока отказов восстанавливаемого объекта может быть представлено в виде

$$h(n) = P_{\bar{n}_0}(n) + \sum_{j=1}^{n-1} h(j) P_{\bar{n}_j}(n-j) [n = 1(1) \infty], \quad (6)$$

где $P_{\bar{n}_0}(n)$ представляет собой вероятность отказа в n -м нагружении объекта, поставленного на эксплуатацию в начальный момент времени $t_0, (n_0)$; $P_{\bar{n}_j}(n-j)$ – вероятность отказа в n -м нагружении объекта, функционирование которого началось после j -го нагружения, т.е. после восстановления объекта или включения в работу взамен отказавшего для всех $[j = 1(1)n - 1]$; n – дискретный аналог текущего времени t работы объекта (нагружения) (вводится при преобразовании непрерывного случайного процесса нагружения в дискретную последовательность некоррелированных случайных нагрузок [1]); \hat{n} – случайная величина наработки объекта до отказа.

Выражение (6) показывает, что интенсивность ординарного потока отказов $h(n)$ в любом n -м нагружении представляет собой сумму вероятностей отказов в этом нагружении восстанавливаемого объекта при всех возможных исходах испытаний, предшествующих моменту n .

По структуре приведенное выше основное уравнение восстановления СТС представляет собой уравнение прогнозирования показателей надежности восстанавливаемого объекта в серии независимых последовательных нагружений, являющейся моделью непрерывного процесса нагружения. Этой задаче были подчинены разработанные выше математические модели прогнозирования как случайного процесса нагружения $\hat{u}(t)$, так и случайных процессов изменения сопротивляемости $\hat{x}(t)$, $\hat{y}(t)$, $\hat{z}(t)$.

Преобразование случайного процесса нагружения $\hat{u}(t)$ по методу некоррелированных максимумов обеспечивает вероятностное описание этого процесса по данным одной, имеющей ограниченную длину реализации (если такой процесс обладает свойством эргодичности). Для описания случайных процессов старения сопротивляемости $\hat{x}(t)$, $\hat{y}(t)$, $\hat{z}(t)$ используется информации о вероятностных свойствах объектов в начальные моменты эксплуатации.

Прогнозирование интенсивности потока отказов восстанавливаемого нестареющего объекта

При применении косвенного метода прогнозирования показателей надежности восстанавливаемых объектов основная характеристика потока отказов – интенсивность потока $h(n)$, находится по формуле (6).

Величины вероятностей $P_{\bar{n}_0}(n)$ и $P_{\bar{n}_j}(n-j)$ определяются по формуле [1]

$$P_{\bar{n}_0}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\bar{u}}(x; x_n) \prod_{i=1}^{n-1} F_{\bar{u}}(x; x_i) \phi_{\bar{x}}(x) dx, \quad (7)$$

$$P_{\hat{n}_j}(n-j) \stackrel{d}{=} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\hat{u}}(x; x_{n-j}) \prod_{i=1}^{n-j-i} F_{\hat{u}}(x; x_i) \phi_{\hat{y}} \left(\frac{x + A_j}{B_j} \right) \frac{dx}{|B_j|}, \quad (8)$$

где $F_{\hat{u}}(x)$ – функция распределения случайной величины нагрузки в одноактном нагружении; $F_{\hat{x}}(x)$ – функция распределения сопротивляемости объекта действующей нагрузке до начала нагружений (эксплуатации); $F_{\hat{y}}(x)$ – функция распределения сопротивляемости объекта, введенного в эксплуатацию взамен отказавшего; $\hat{x}_i = \hat{x} \left[1 + b(i-1)^\alpha \right] - a(i-1)^\alpha$ – функция старения сопротивляемости объекта введенного в эксплуатацию до начала первого нагружения, a, b, α – параметры старения объекта при функционировании; $\hat{y}_n = \hat{y} \left[1 + b_x(n-1)^{\alpha_x} \right] - a_x(n-1)^{\alpha_x}$ – функция старения запасного объекта до момента n использования его взамен отказавшего, a_x, b_x, α_x – параметры старения запасного объекта при его хранении до начала применения; $\hat{z}_n = \hat{z} \left[1 + b(n-1)^\alpha \right] - a(n-1)^\alpha$ – функция старения сопротивляемости \hat{z}_n объекта, восстановленного в момент времени n , a, b, α – параметры старения объекта при функционировании.

В частном случае, рассматриваемом в данной статье, при отсутствии старения запасных объектов при хранении ($a_x = b_x = \alpha_x = 0$) восстановление сопротивляемости объекта после отказов производится каждый раз до некоторого в стохастическом смысле неизменного уровня \hat{y} с плотностью распределения $\phi_{\hat{y}}(x)$ для $[j=1(1)n-1]$, при этом имеем

$$P_{\hat{n}_1}(n-j) = P_{\hat{n}_2}(n-j) = \dots = P_{\hat{n}_j}(n-j) = \dots = P_{\hat{n}_{n-1}}(n-j) = P_{\hat{n}}(n-j), \quad (9)$$

где $P_{\hat{n}}(n-j) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\hat{u}}(x; x_{n-j}) \prod_{i=1}^{n-j-i} F_{\hat{u}}(x; x_i) \phi_{\hat{y}}(x) dx$.

С учетом (9) выражение (6) принимает вид

$$h(n) = P_{\hat{n}_0}(n) + \sum_{j=1}^{n-1} h(j) P_{\hat{n}}(n-j), [n=1(1)\infty], \quad (10)$$

и закон распределения $P_{\hat{n}}(n-j)$ становится безусловным, так как для всех j уровень восстановления свойств объекта после отказа в любом нагружении вплоть до $n-1$ остается неизменным.

Если все случайные величины наработок на отказ $\hat{n}_1, \hat{n}_2, \dots, \hat{n}_j, \dots, \hat{n}$ имеют один и тот же закон распределения, как в случае (10), то такой поток отказов $I(n)$ называется **рекуррентным потоком**.

Если же $P_{\hat{n}_j}(n-j) = P_{\hat{n}}(n-j)$, $[j=2(1)\infty]$, а $P_{\hat{n}_1}(n-j) \neq P_{\hat{n}}(n-j)$, то поток отказов $I(n)$ называется **рекуррентным потоком с запаздыванием**. Рекуррентной называют формулу, которая позволяет шаг за шагом определить любой член последовательности, если известны j ее первых членов.

Если в дополнение к условию (9) потребовалось, чтобы восстановление после каждого отказа осуществлялось до первоначального в стохастическом смысле уровня сопротивляемости, т.е. $\phi_{\hat{y}}(x) = \phi_{\hat{x}}(x)$, то нетрудно видеть, что

$$P_{\hat{n}_0}(n) = P_{\hat{n}}(n), [n=1(1)\infty], \quad (11)$$

и выражение (10) принимает вид

$$h(n) = P_{\hat{n}_0}(n) + \sum_{j=1}^{n-1} h(j) P_{\hat{n}_0}(n-j), \quad (12)$$

где, как и ранее, $P_{\hat{n}_0}(n)$ – дискретный аналог безусловной плотности распределения наработки до первого отказа.

При отсутствии старения объектов при функционировании ($a = b = \alpha = 0, F_u^-(x; x_n) = F_u^-(x), [n = 1(1)\infty]$) выражения (7) и (8), определяющие значения вероятностей $P_{\bar{n}_0}(n)$ и $P_{\bar{n}_j}(n-j), [j = 1(1)n-1]$, принимают вид

$$P_{\bar{n}_0}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} R_u(x) F_u^{n-i}(x) \phi_{\bar{x}}(x) dx, \quad (13)$$

$$R_{\bar{n}_j}(n-j) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\bar{u}}(x) F_{\bar{u}}^{n-j-i}(x) \phi_{\bar{y}}\left(\frac{x + A_j}{B_j}\right) \frac{dx}{|B_j|}. \quad (14)$$

Отметим, что отсутствие старения сопротивляемости не изменяет структуры и смысла выражений (6), (10) и (12) для определения интенсивности потока отказов $h(n)$, но упрощает при этом формулы для вычисления вероятностей $P_{\bar{n}_0}(n)$ и $P_{\bar{n}_j}(n-j)$. Отсутствие старения сопротивляемости объекта в ходе функционирования исключает в разработанной модели необходимость изменения от нагружения к нагружению начала отсчета и масштаба нагрузки, оставляя при этом без изменения все остальные факторы, влияющие на $\phi_{z_n}(x)$ и в целом на модель потока отказов. В теории восстановлений [2] связь между интенсивностью потока отказов $h(t)$ и плотностью распределения наработки на отказ $\phi_{\hat{\theta}}(t)$ устанавливается через основное уравнение восстановления, которое для рекуррентных потоков имеет вид

$$h(t) = \phi_{\hat{\theta}}(t) + \int_0^t h(\tau) \phi_{\hat{\theta}}(t - \tau) d\tau, \quad (15)$$

где $\hat{\theta}$ – случайное время наработки на любой из отказов объекта; t – текущее время с начала эксплуатации (прогнозирования); τ – текущее время с момента последнего отказа объекта.

Для рекуррентного потока с запаздыванием уравнение восстановления принимает вид [2]

$$h(t) = \phi_{\hat{\theta}_1}(t) + \int_0^t h(\tau) \phi_{\hat{\theta}}(t - \tau) d\tau, \quad (16)$$

где $\phi_{\hat{\theta}_1}(t)$ – плотность распределения времени наработки на первый отказ объекта, отличающаяся от закона распределения наработок на второй и последующие отказы.

Сравнение выражений (10) и (16) показывает, что по своей структуре и по физическому смыслу выражение (10) является дискретным аналогом известного уравнения восстановления (16) [2] для рекуррентных потоков с запаздыванием. При этом распределение $P_{\bar{n}}(n)$ можно рассматривать как дискретный аналог закона распределения наработки между отказами $\phi_{\hat{\theta}}(t)$. Аналогичный вывод можно сделать и из сравнения выражений (12) и (15) для простых рекуррентных потоков.

Выражение (6) следует рассматривать как более общую дискретную форму основного уравнения восстановления по сравнению с известным уравнением восстановления (16) для непрерывного времени. Формула (6) позволяет, в общем случае, определять интенсивность ординарного потока отказов $h(n)$ при различных законах распределения наработки на очередной отказ обусловленных старением объектов, используемых для замены отказавших.

Заключение

Получаемые с помощью приведенных выше моделей функции $h(n)$, $P_{\bar{n}_0}(n)$ и $P_{\bar{n}_j}(n-j)$ в зависимости от характера процессов нагружения ($F_u^-(u)$) и параметров старения ($a, b, \alpha, a_x, b_x, \alpha_x$),

а также от уровня восстановления сопротивляемости после отказов \hat{y} могут принимать различную, зачастую «нетипичную» форму. Именно действительное изменение этих вероятностей во времени, а не «типовой» закон их изменения, представляет основной интерес для практики.

При необходимости перехода к типовому теоретическому закону распределения наработки на отказ СТС, наличие законов $P_{\bar{n}}(n)$ и $P_{\bar{n}_j}(n)$ всегда позволяют оценить погрешность такого перехода, а следовательно, и погрешность замены реального потока отказов теоретической моделью.

Список литературы

1. Дедков, В. К. Косвенные методы прогнозирования надежности / В. К. Дедков, Н. А. Северцев. – М. : ВЦ им. Дородницына РАН, 2006. – 272 с.
2. Кокс, Д. Теория восстановления / Д. Кокс, В. Смит. – М. : Сов. радио, 1967. – 299 с.

УДК 519.711

Дедков, В. К.

Интегральное уравнение восстановления на основе косвенного метода измерения показателей надежности сложных технических объектов / В. К. Дедков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. С. – 58–63.

Дедков Виталий Кириллович

доктор технических наук, профессор,
научный сотрудник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
8-495-135-61-95
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается косвенный метод измерения и прогнозирования интенсивности потока отказов восстанавливаемого нестареющего объекта и дается сравнение этого метода с методом прямого измерения. Делается вывод основного интегрального уравнения восстановления на основе косвенного метода измерения показателей надежности. Показана физическая сущность процессов, отображаемых различными составляющими этого уравнения.

Ключевые слова: интегральное уравнение восстановления, поток отказов, интенсивность потока, параметр потока, простейший поток отказов, нагружение, сопротивляемость, случайный стационарный процесс нагружения.

V. Dedkov

Doctor of Technical Science, professor, the scientific worker of the division of safety and nonlinear analysis the establishment of the Russian academy of sciences computer center A. A. Dorodnitsyn,
Russian academy of sciences
119333, Moscow, Vavilova street, 40.
8-495-135-61-95
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

Abstract. In this article the indirect method of measurement and forecasting of intensity of a stream of refusals of restored ageless object is considered and comparison of this method with a method of direct measurement is given. The conclusion of the main integrated equation of restoration on the basis of an indirect method of measurement of indicators of reliability is drawn. The physical essence of the processes displayed by various components of this equation is shown.

Key words: integrated equation of restoration, stream of refusals, intensity of a stream, stream parameter, the simplest stream of refusals, loading, resilience, casual stationary process of loading.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ КЕРМЕТНЫХ РЕЗИСТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

К. И. Домкин, В. Г. Недорезов

Научно-технический прогресс неизменно связан с разработкой современных материалов с заданными свойствами. Важнейшим направлением в данной области является электронное материаловедение. В настоящее время наряду с работами по созданию новых материалов для активных элементов на основе полупроводников развиваются и направления, связанные с созданием материалов для пассивной электронной компонентной базы. К изделиям пассивной электроники относятся и резисторы.

Технология получения керметных толсто пленочных резистивных материалов [1] включает приготовление резистивной композиции в виде пасты, получение отпечатка резистивной пасты требуемой конфигурации на диэлектрическом основании, вжигание резистивного слоя, подгонку к заданному значению сопротивления и контроль параметров. Эта технология отличается достаточной простотой по сравнению с технологией получения резистивных элементов методом испарения или технологией изготовления проволочных и фольговых резисторов. Несмотря на кажущуюся простоту технологии, на электрические и эксплуатационные свойства изделий из керметных композиций оказывают существенное влияние факторы, которые можно условно разделить на две основные группы:

- собственно резистивная композиция (ее состав, метод подготовки, дисперсность составляющих частей и т.д.);
- технологические режимы трафаретной печати и термообработки резистивного слоя.

Одной из главных проблем толсто пленочного резисторного материаловедения является поиск составов паст и режимов их обжига, позволяющих получить резистивные материалы с широким и плавно регулируемым диапазоном номинальных сопротивлений при малом абсолютном значении ТКС и удовлетворительной временной стабильности сопротивления.

Процесс разработки керметных резисторов является энерго- и материалоемким процессом, требующим проработки различных технологий, конструкций и материалов. Оптимизация данного процесса представляется возможной с использованием моделирования на каждом этапе разработки.

Первой операцией процесса производства является измельчение исходных материалов [2]. Основной характеристикой измельченного материала является его гранулометрический состав [3] (рис. 1). Процесс измельчения происходит до тех пор, пока не будет достигнута заданная функция гранулометрического распределения. На основе экспериментальных данных была получена функция разрушения, зависящая только от относительной массы частиц m/m' в виде гауссиана с максимумом в $m/m' = 0,5$:

$$f(m, m') = \frac{A}{m'} \exp \left(- \frac{\left(\frac{m}{m'} - 0,5 \right)^2}{2\sigma^2} \right).$$

В процессе разработки резистивных композиций экспериментально определено характерное время разрушения в планетарно-центробежной мельнице – 1–3 с. Существенен тот факт, что оно, как оказалось, зависит от материала, поэтому эффективность ударов в мельнице различна. Определен вид функции разрушения для модельных веществ. Она оказалась довольно узкой и центрированной на $m/m' \sim 0,5$. Множественность образования осколков рассмотрена с точки зрения теории хрупкого разрушения. Найдено, что существует критический размер, ниже которого частицы раскалываются пополам.

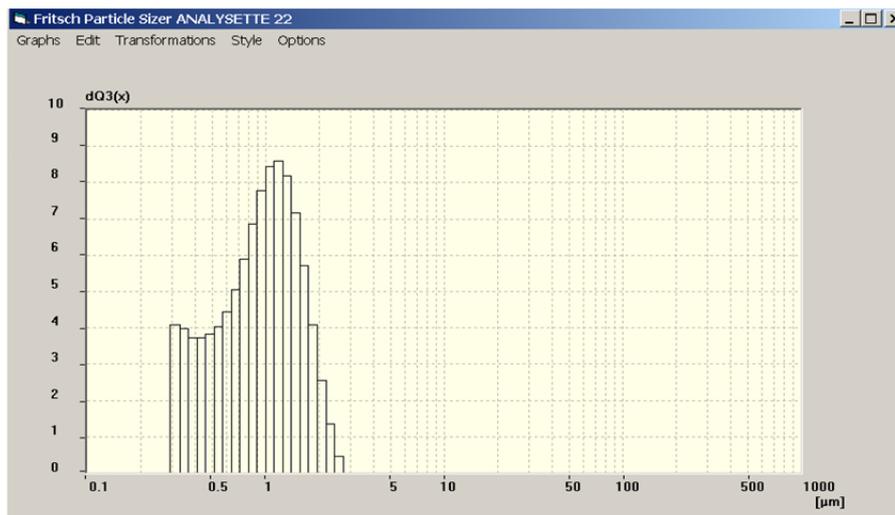


Рис. 1. Гранулометрический состав порошков стеклофазы ЗС-71 после 8-часового измельчения

Следующей технологической операцией является формирование (рис. 2) и спекание (рис. 3) резистивной композиции.

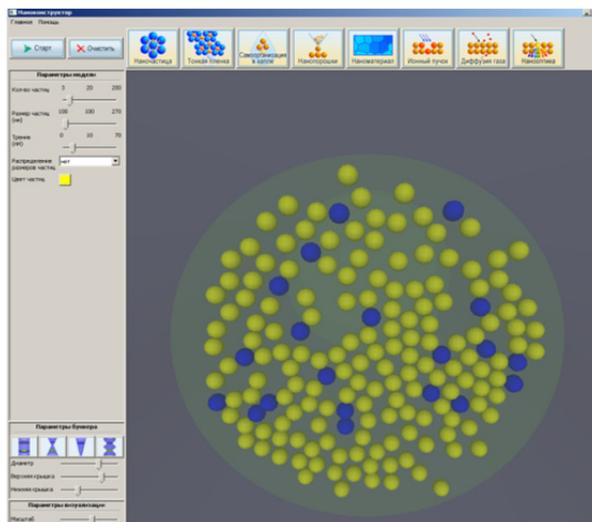


Рис. 2. Моделирование многокомпонентной резистивной композиции

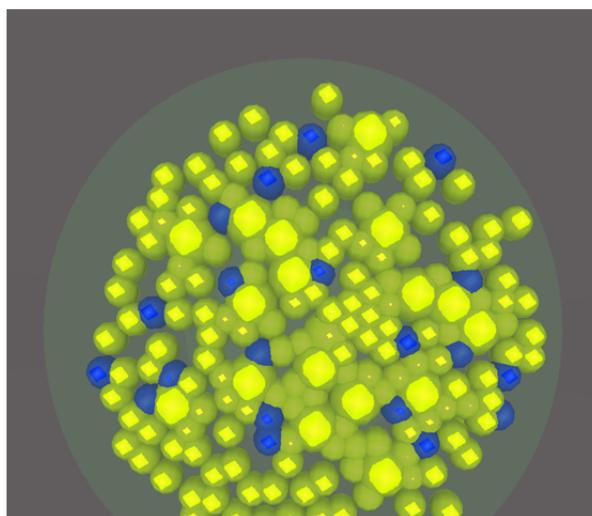


Рис. 3. Моделирование процесса спекания резистивной композиции

Следующая стадия – разработка конструкции с последующей трафаретной печатью и формирование контактов. Далее следует прогнозирование поведения системы при воздействии различных факторов.

На рис. 4 представлены результаты разработки резистора для поверхностного монтажа с использованием моделирования. Нетрудно заметить, что подбор и проверку теплофизических свойств материала подложки можно проводить на этапе проектирования.

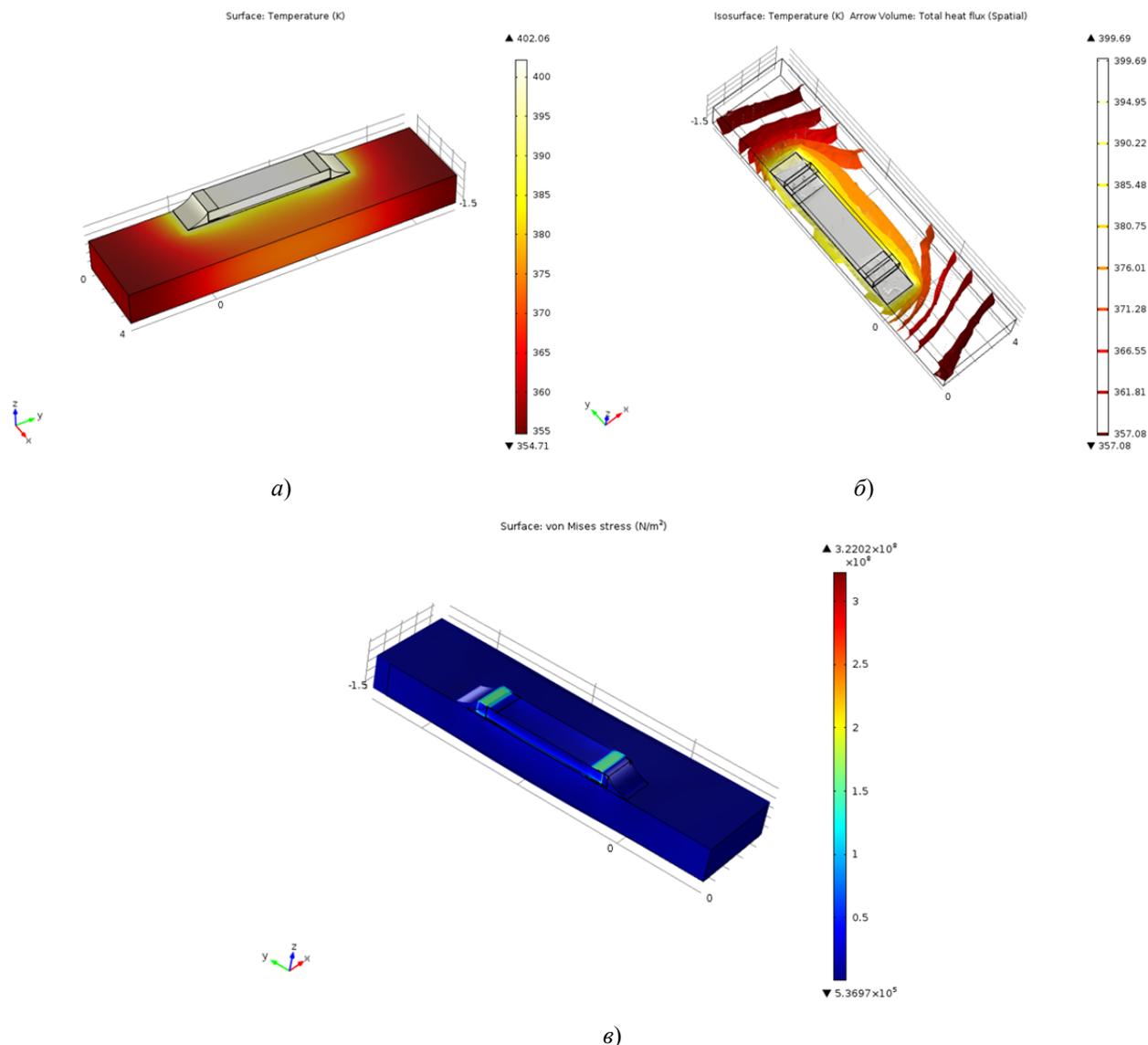


Рис. 4. Моделирование резистора для поверхностного монтажа:
 а – распределение температуры по поверхности подложки, б – эквипотенциальные поверхности внутри подложки, в – механические напряжения в системе резистор-контакт-подложка

На рис. 5 приведены основные этапы отработки конструкций резистивных элементов. Первоначально выбираются материалы резистора, контактов и подложки и моделируется их геометрия (рис. 5,а). Далее строится модель распределения потенциала в системе (рис. 5,б), в которой задаются максимальные значения напряжения на резисторе. Следующим этапом строится модель распределения температуры по поверхности (рис. 5,в). Затем анализируются возможные механические напряжения, которые могут возникнуть в процессе работы изделия (рис. 5,г). Окончательным этапом является моделирование рассеяния мощности на разрабатываемом резисторе.

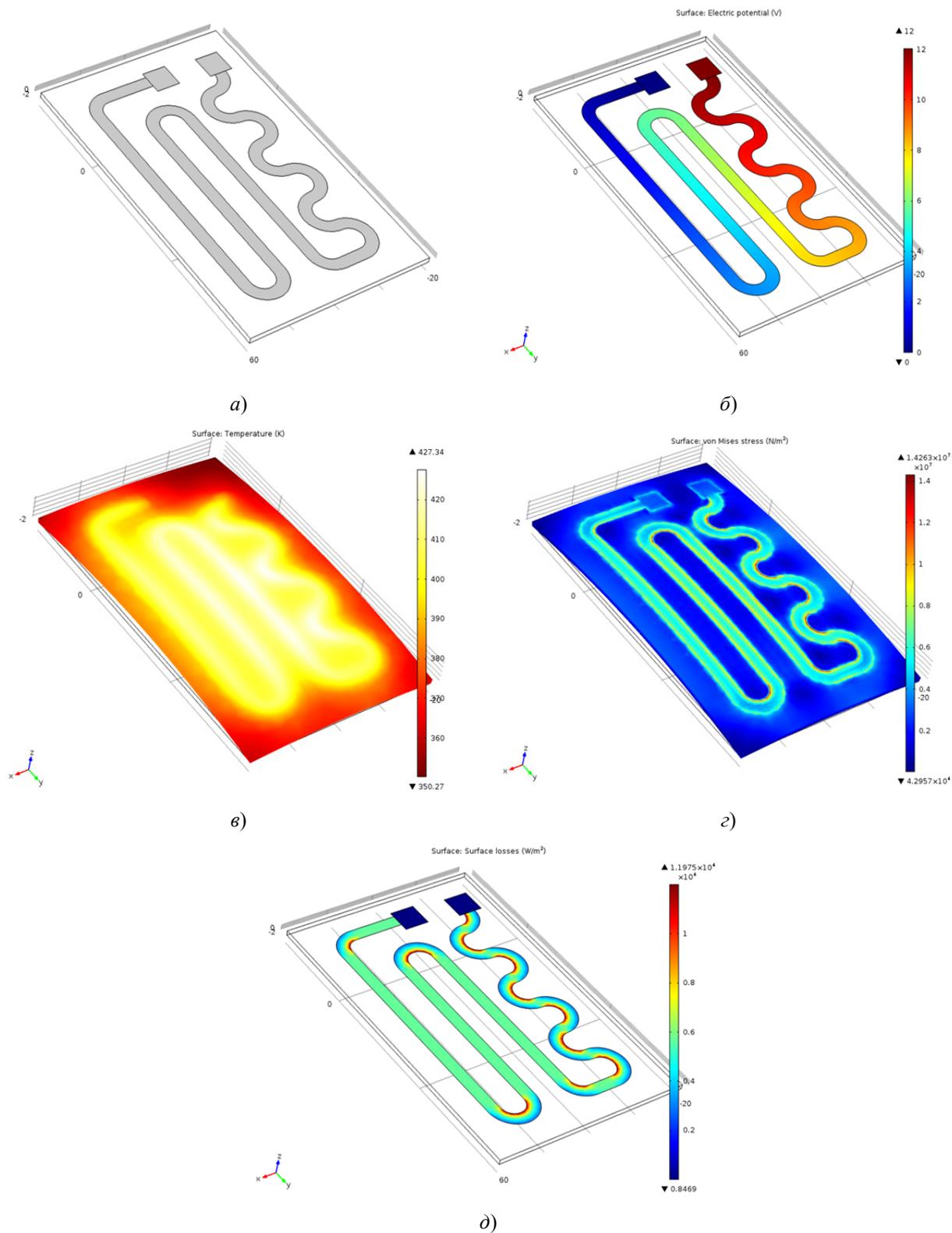


Рис. 5. Этапы разработки резистора: *а* – конструкция; *б* – распределение потенциала; *в* – распределение температуры; *г* – механические напряжения; *д* – рассеяние мощности

При обнаружении несоответствия параметров с запланированными разработчик может повторить как весь цикл моделирования, так и его отдельные этапы [4].

Таким образом, используя современные методы и средства моделирования, можно не только ускорить, но и удешевить процесс разработки новых керметных резисторов и сборок на их ос-

нове. Также эти средства и методы позволят существенно разнести в пространстве процессы разработки и процессы создания опытных образцов.

Список литературы

1. Недорезов, В. Г. Технология керметных резистивных структур и компонентов на их основе : моногр. / В. Г. Недорезов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. – 220 с.
2. Домкин, К. И. Моделирование процесса сухого измельчения порошковых материалов / К. И. Домкин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 131–138.
3. Каминская, Т. П. Современные методы анализа гранулометрического состава порошков / Т. П. Каминская, К. И. Домкин // Перспективные материалы. – 2008. – Специальный выпуск № 6, ч. 1. – С. 237–240.
4. Домкин, К. И. Фотонные кристаллы и устройства // Надежность и качество – 2012 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 252–255.

УДК 621.316.8

Домкин, К. И.

Оптимизация разработки керметных резисторов с помощью моделирования / К. И. Домкин, В. Г. Недорезов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 64–68.

Домкин Кирилл Иванович

инженер, ОАО НИИЭМП
440600, г. Пенза, ул. Каракозова, 44.
+7 (8412) 47-71-01
E-mail: ego85@mail.ru

Недорезов Валерий Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
генеральный директор,
ОАО НИИЭМП
440600, Пенза, ул. Каракозова, 44.
(8412) 47-71-01
E-mail: nedval@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрено моделирование основных этапов разработки керметных резисторов. Показано, что моделирование позволяет существенно снизить затраты разработчиков.

Ключевые слова: резистор, кермет, моделирование.

K. Domkin

the engineer joint stock company NIEMP
440600, Penza, Karakosova street, 44.
+7 (8412) 47-71-01
E-mail: ego85@mail.ru

V. Nedorezov

Doctor of Technical Science, professor,
General Director joint stock company NIEMP
440600, Penza, Karakosova street, 44.
(8412) 47-71-01
E-mail: nedval@yandex.ru

Abstract. Modeling of the main development stages of kermetny resistors is considered. It is shown that modeling allows to lower expenses of developers significantly.

Key words: resistor, kermet, modeling.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА
И ТЕОРИИ КАТАСТРОФ СИНДРОМА ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ****В. А. Острейковский**

В течение последних двух десятилетий в рамках исследований по искусственному интеллекту формировалось самостоятельное направление – инженерия знаний и его раздел «Интеллектуальные информационные системы» (ИИС). В задачу этого направления входят исследование и разработка программ (устройств), использующих знания и процедуры логического вывода для решения задач, являющихся трудными для экспертов. ИИС могут быть отнесены к системам искусственного интеллекта общего назначения, т.е. системам, которые не только исполняют заданные процедуры, но на основе метапроцедур поиска генерируют и используют процедурные знания для решения новых конкретных задач. На практике ИИС используются прежде всего как «системы – советчики» в тех ситуациях, где специалист сомневается в выборе правильного решения. Экспертные знания, хранящиеся в памяти системы, более глубокие и полные, чем соответствующие знания пользователя.

Приобретение знаний является одним из узких мест процесса разработки ИИС. Так как инженер по знаниям имеет гораздо меньше знаний о предметной области, чем эксперт, то возникают проблемы взаимодействия, препятствующие процессу переноса опыта эксперта в вычислительную программу. Одним из способов получения новых знаний является обработка опыта экспертов и данных мониторинга объекта с помощью соответствующего математического аппарата.

В настоящий момент в отделении реанимации новорожденных принятие решений, связанных с постановкой диагноза и последующего лечения, принимается на уровне использования личного опыта врачей отделения. Принятие решения врачами отделения – одна из самых критичных областей деятельности отделения, так как неверное решение может привести к ухудшению состояния пациента или даже к его гибели. Уменьшения показателей смертности новорожденных можно добиться путем внедрения ИИС, позволяющих в критических ситуациях оценить положение объекта управления и помочь в принятии решения на основе как личного опыта врача, так и на основе базы знаний, имеющей в своем составе структурированные знания по предметной области. Использование таких систем, как советчики, системы принятия решений, экспертные системы, облегчит задачу оперативного установления диагноза и принятия решения для эффективного лечения с целью уменьшения риска летального исхода и последующих за выпиской осложнений. В статье [1] приведены линейные многофакторные модели оксигенотерапии респираторным дистресс-синдромом новорожденных.

Целью данной статьи является отыскание математических моделей второго порядка с учетом квадратичных эффектов с помощью методов теории катастроф и многомерного регрессионного анализа применительно к больным с синдромом дыхательных путей.

Характеристика предметной области

В структуре перинатальной заболеваемости и смертности респираторный дистресс-синдром новорожденных (РДСН) занимает ведущее место. В повседневной практике РДСН устанавливается как самостоятельный диагноз.

Термины синдром дыхательных путей (СДР) и болезнь гиалиновых мембран (БГМ) в зарубежной литературе синонимы. СДР является более общим термином в отличие от РДСН, так как является синдромом, наблюдающимся как у доношенных, так и у недоношенных детей, РДСН же можно отнести к недоношенным. Частота развития СДР зависит от степени недонашивания беременности.

В настоящее время не существует окончательно установленного метода лечения РДСН. Все терапевтические мероприятия носят симптоматический характер и сводятся лишь к поддержанию

жизнедеятельности организма. Их непосредственными целями являются: обеспечение эффективной вентиляции легких, коррекции нарушений кислотно-щелочного равновесия, обеспечение оптимальной температуры окружающей среды и поддержания нормального уровня кровяного давления. Для частичного или полного замещения функции внешнего дыхания у больных, находящихся в критических состояниях применяется искусственная вентиляция легких (ИВЛ). Она может быть контролируемой, когда все параметры вентиляции задаются респиратором, или вспомогательной, когда хотя бы один из параметров (например, частота дыхания) определяется пациентом. Из вспомогательных режимов ИВЛ наиболее распространенным в педиатрической практике является режим, при котором аппарат обеспечивает установленное количество контролируемых вдохов, между которыми больной может дышать самостоятельно.

При построении уравнений множественной регрессии основным этапом является отбор наиболее существенных факторов, воздействующих на результирующий признак. На основе исследованной предметной области были выделены основные управляющие и контролируемые параметры, между которыми необходимо установить зависимости.

Основным поражающим фактором СДР является гипоксия (кислородное голодание). Движение газов в организме происходит в результате разницы парциальных давлений. Парциальное давление – это та часть давления, которую составляет данный газ из общей смеси газов. Понижение давления O_2 в ткани способствует движению кислорода к ней. Для CO_2 градиент давления направлен в обратную сторону, и CO_2 с выдыхаемым воздухом уходит в окружающую среду. Изучение физиологии дыхания фактически сводится к изучению этих градиентов и того, как они поддерживаются.

Парциальное давление кислорода (PaO_2) является основной движущей силой кислорода к тканям и основным контролируемым параметром.

Среднее давление в дыхательных путях (МАР) является интегральным показателем, отражающим влияние таких параметров вентиляции, как пиковое давление вдоха, положительное давление в конце выдоха, время вдоха, время выдоха, а также скорости газотока. Величина МАР мониторируется большинством современных аппаратов ИВЛ.

Величина МАР – один из самых информативных показателей ИВЛ. МАР прямо коррелирует с уровнем оксигенации крови, т.е. чем выше МАР, тем выше PaO_2 . С другой стороны, повышение МАР увеличивает опасность негативного влияния на гемодинамику. Изменяя параметры вентиляции, врач должен подумать прежде всего о том, как это отразится на МАР.

Очень важным управляющим параметром является фракция кислорода FiO_2 . Он показывает процентное содержание кислорода в воздушной массе, подаваемой ребенку для дыхания. FiO_2 может изменяться в пределах от 21 (норма) до 100 %.

Основными показателями гемодинамики больного являются: частота сердечных сокращений (ЧСС) и среднее давление в крови (АДср). За данными параметрами ведется постоянный мониторинг.

Величина $TspO_2$ определяет значение давления кислорода в артериальной крови, измеренное неинвазивным чрескожным методом. Поэтому для статистических исследований оценки состояния пациента экспертным путем были выбраны следующие параметры: $TspO_2$ (парциальное давление кислорода), FiO_2 (фракция кислорода), МАР (среднее давление в дыхательных путях), ЧСС (частота сердечных сокращений), АДср (среднее давление в крови).

Путем анализа предметной области и экспертного опроса специалистов-врачей был сделан вывод, что наиболее важная переменная, которая может быть зависимой переменной (откликом) в регрессионном анализе – это парциальное давление кислорода ($TspO_2$), измеренное с помощью транскутанного мониторинга. Кроме $TspO_2$, в качестве зависимых переменных могут быть использованы также параметры искусственной вентиляции легких: МАР или FiO_2 , значения которых устанавливаются врачами в процессе лечения больных.

Для сбора статистических данных использовались истории болезней пациентов с РДС-синдромом. Исследования проводились по двум группам пациентов по исходу болезни: умершие и выжившие.

Так как РДС поражает 80 % случаев недоношенных детей, и случаи возникновения РДС у доношенных детей редки и, как правило, не приводят к смертельному исходу, исследованию подверглись недоношенные дети со сроком гестации от 26 до 39 недель. Возраст пациентов до 7 дней

жизни, так как острый период заболевания приходится на 2 – 3 день. Среднее время пребывания детей на ИВЛ – 5 дней.

Все дети находились на ИВЛ. Так как учет параметров в отделении производится ежечасно, в исследовании была сохранена такая дискретность.

Объем собранного статистического материала приведен в табл 1.

Таблица 1

Показатели	Группа выживших	Группа умерших
Число пациентов	19	9
Число измерений	952	394

Построение уравнений регрессии

Для целей исследования были использованы следующие уравнения регрессии.

Уравнение линейной регрессии:

$$Y_1(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon_1, \quad (1)$$

где β_0, β_i – коэффициенты регрессии; $i = \overline{1, k}$ – число независимых переменных (факторов); ε_1 – стандартная ошибка.

Уравнение регрессии второго порядка с учетом линейных и квадратичных эффектов:

$$Y_2(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon_2, \quad (2)$$

где β_{ii} – коэффициенты регрессии, учитывающие влияние квадратичных эффектов факторов на функцию отклика $Y_2(X)$.

Уравнение регрессии второго порядка с учетом линейных, квадратичных эффектов и эффектов взаимодействия факторов:

$$Y_3(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon_3, \quad (3)$$

где β_{ij} – коэффициенты регрессии, учитывающие влияние взаимодействия факторов на функцию отклика $Y_3(X)$.

С помощью ППП STATISTICA 6.0 были получены значения коэффициентов регрессии уравнений (1)–(3) по статистическим данным ОРПН МГБ №1 г. Сургута. Для построения линейной модели был использован тип Multiply regression, который позволяет построить линейную модель регрессии. Для построения второй модели использовался тип Polynomial regression, для третьей – Response Surface Regression.

Примем обозначения: $Y = T_{cp}O_2$, $X_1 = FiO_2$, $X_2 = MAP$, $X_3 = ЧСС$, $X_4 = Адрс$. Тогда в окончательном виде уравнения (1)–(3) имеют следующий вид:

1) для группы выживших пациентов:

– линейная модель:

$$Y(X) = 82,87(\pm 3,457) - 0,002(\pm 0,043)X_1 - 0,421(\pm 0,091)X_2 + 0,073(\pm 0,0196)X_3 - 0,182(\pm 0,038)X_4 + 15,61; \quad (4)$$

– модель, учитывающая линейные и квадратичные эффекты:

$$Y(X) = 96,35(\pm 8,297) - 5,44(\pm 1,028)X_1 - 1,399(\pm 0,226)X_2 + 0,141(\pm 0,082)X_3 - 0,622(\pm 0,2498)X_4 + 0,051(\pm 0,0096)X_1^2 + 0,008(\pm 0,002)X_2^2 - 0,0003(\pm 0,0004)X_3^2 + 0,004(\pm 0,002)X_4^2; \quad (5)$$

– модель, учитывающая линейные эффекты, эффекты взаимодействия факторов и квадратичные эффекты:

$$Y(X) = 98,92(\pm 17,26) - 7,122(\pm 1,292)X_1 + 1,232(\pm 1,858)X_2 + 0,056(\pm 0,145)X_3 - 0,756(\pm 0,347)X_4 + 0,043(\pm 0,023)X_1X_2 - 0,00046(\pm 0,0034)X_1X_3 - 0,0092(\pm 0,0104)X_2X_3 + 0,0036(\pm 0,0030)X_1X_4 - 0,026(\pm 0,017)X_2X_4 + 0,0019(\pm 0,0018)X_3X_4 + 0,063(\pm 0,011)X_1^2 + 0,0082(\pm 0,0016)X_2^2 - 0,00016(\pm 0,00040)X_3^2 + 0,0046(\pm 0,0023)X_4^2; \quad (6)$$

2) для группы умерших пациентов:

– линейная модель:

$$Y(X) = 47,31(\pm 8,145) - 0,176(\pm 0,106)X_1 - 0,172(\pm 0,0705)X_2 + 0,098(\pm 0,049)X_3 + 0,132(\pm 0,051)X_4 + 18,26; \quad (7)$$

– модель, учитывающая линейные и квадратичные эффекты:

$$Y(X) = 22,44(\pm 22,11) - 46,49(\pm 3,201)X_1 + 1,143(\pm 0,205)X_2 + 0,315(\pm 0,334)X_3 + 1,129(\pm 0,219)X_4 + 0,456(\pm 0,032)X_1^2 - 0,008(\pm 0,001)X_2^2 - 0,001(\pm 0,001)X_3^2 - 0,009(\pm 0,002)X_4^2; \quad (8)$$

– модель, учитывающая линейные эффекты, эффекты взаимодействия факторов и квадратичные эффекты:

$$Y(X) = 13,84(\pm 31,24) - 83,22(\pm 13,84)X_1 + 3,260(\pm 0,980)X_2 - 0,159(\pm 0,375)X_3 + 0,337(\pm 0,554)X_4 + 0,900(\pm 0,333)X_1X_2 + 0,064(\pm 0,023)X_1X_3 - 0,0092(\pm 0,0050)X_2X_3 + 0,3939(\pm 0,1506)X_1X_4 - 0,0268(\pm 0,012)X_2X_4 + 0,0037(\pm 0,0027)X_3X_4 + 0,351(\pm 0,054)X_1^2 - 0,0097(\pm 0,0017)X_2^2 + 0,00050(\pm 0,0013)X_3^2 - 0,0060(\pm 0,0024)X_4^2. \quad (9)$$

Для оценки степени зависимости между случайными величинами X и Y использованы коэффициенты множественной корреляции r_{XY} и детерминации r_{XY}^2 [2, 3]:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{M[(X - m_X)(Y - m_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y},$$

где M – оператор математического ожидания; m_X , σ_X , m_Y , σ_Y – соответственно математические ожидания и среднеквадратические отклонения случайных величин X и Y .

В табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции и детерминации для уравнений (4)–(9).

Анализ полученных значений коэффициентов регрессии, корреляции и детерминации позволяет получить следующие выводы:

– сравнение линейной регрессионной модели, квадратичной модели, модели взаимодействия факторов и модели взаимодействия факторов с квадратичными эффектами показывает, что модели второго порядка ближе описывают зависимость функции отклика $\text{TrpO}_2 = F\{\text{FiO}_2, \text{MAP}, \text{ЧСС}, \text{АДср}\}$ от независимых переменных, чем модели первого порядка; причем это характерно для обеих исследуемых групп пациентов;

– значения коэффициентов r_{XY} и r_{XY}^2 как в линейном случае, так и в случае учета квадратичных эффектов существенно различаются для групп выживших и умерших пациентов в 1,5÷2,0 раза;

– влияние квадратичных эффектов и эффектов взаимодействия на функцию отклика во всех моделях и обеих групп пациентов значительно ниже, чем влияние линейных членов;

– из рассмотренных независимых переменных наибольший вклад в функцию отклика вносит фракция кислорода FiO_2 ;

– сравнение коэффициентов детерминации и корреляции у двух исследуемых групп пациентов свидетельствует, что зависимость между откликом и независимыми переменными в группе умерших более заметна, чем у выживших пациентов. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что в группе умерших пациентов все жизненные процессы протекают более однородно.

Таблица 2

Показатели		Коэффициент множественной корреляции r_{XY}	Коэффициент детерминации r_{XY}^2
Группа выживших	линейная модель	0,226	0,051
	квадратичная модель	0,330	0,109
	модель, учитывающая квадратичные эффекты и взаимодействие факторов	0,341	0,116
Группа умерших	линейная модель	0,193	0,371
	квадратичная модель	0,677	0,458
	модель, учитывающая квадратичные эффекты и взаимодействие факторов	0,686	0,471

**Построение моделей катастроф типа «складка» и «сборка»
для пациентов с РДС на основании регрессионной квадратичной модели**

В литературе [4–6] отсутствуют сведения о возможности использования функций отклика многофакторной модели, описывающей состояние объекта в многомерной области. В данной статье сделана попытка нахождения локальных максимумов и минимумов, характеризующих моменты наступления катастроф складки и сборки. Под катастрофой понимается наступление летального исхода пациента.

Как известно, потенциальная энергия E (характеризующая состояние пациента с РДС) аналитически имеет вид:

– для катастрофы складки

$$E_a(x) = \frac{1}{3}x^3 + ax; \quad (10)$$

– для катастрофы сборки

$$E_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx, \quad (11)$$

где коэффициенты a и b – параметры управления.

Многообразие катастрофы M для уравнения (10) определяется уравнением

$$0 = \frac{d}{dx} E_a(x) = x^2 + a. \quad (12)$$

Там, где функция полной потенциальной энергии имеет строгий локальный минимум, объект находится в устойчивом равновесии (критическая точка не вырождена). При некотором ухудшении состояния пациента (например, при уменьшении АДср и FiO₂, увеличении ЧСС) минимум критической точки вырождается. Затем при последующей малой «деформации» вырожденная критическая точка как структурно-неустойчивая распадается на невырожденные или исчезает (табл. 3, 4). Состояние пациента при этом, следуя принципу минимума потенциальной энергии, скачкообразно переходит в новое состояние (потеря устойчивости организма со всеми вытекающими последствиями).

Таблица 3

Группа выживших

Показатели	FiO ₂	МАР	ЧСС	АДср
Среднее	0,37	5,65	128,62	54,57
Минимальное	0,20	0,60	14,00	8,00
Максимальное	1,00	13,00	189,00	93,00

Таблица 4

Группа умерших

Показатели	FiO2	МАР	ЧСС	АДср
Среднее	0,58	9,72	137,58	52,51
Минимальное	0,2	0,3	47	13
Максимальное	1	20,5	182	97

Рассмотрим уравнение (12) при допущениях, что $x = 1$, рассчитаем коэффициент a :

$$a = E(x) - \frac{1}{3}. \quad (13)$$

Подставив полученное значение параметра a в уравнение (13), получим

$$x^2 - \frac{1}{3} + E(x) = 0. \quad (14)$$

За значения X_i ($i = 1, 2, 3, 4$) возьмем их среднее, минимальное и максимальное значения, учитывая разброс (слева, справа, в центре интервала).

Рассчитаем значение Y , так как необходимо учесть среднее, максимальное и минимальное значения параметров, а также ошибки в расчетах коэффициентов в уравнениях регрессии (5), (8), (6), (9), получим девять значений Y .

Таблица 5

Группа выживших

Значение Y	Без учета ошибки	Максимальное с учетом ошибки	Минимальное с учетом ошибки
Значение параметров			
Среднее	79,49	106,23	52,74
Минимальное	93,26	110,73	75,796
Максимальное	64,29	89,97	38,62

Таблица 6

Группа умерших

Значение Y	Без учета ошибки	Максимальное с учетом ошибки	Минимальное с учетом ошибки
Значение параметров			
Среднее	-13,82	20,87	-48,52
Минимальное	-3,18	19,08	-25,43
Максимальное	172,63	154,72	190,54

Построим кривые зависимостей $TspO_2$ (FiO2,МАР, ЧСС, АДср) для группы выживших и группы умерших. Для этого примем значение стандартной деформации $E(x) = Y$, где Y выберем из табл. 5 для группы выживших пациентов и из табл. 6 для группы умерших пациентов и подставим Y в уравнение (14).

Значения параметров модели, учитывающей квадратичные эффекты и катастрофу сборки, приведены в табл. 7, 8.

Таблица 7

Группа выживших

Значение Y	Без учета ошибки	Максимальное с учетом ошибки	Минимальное с учетом ошибки
Значение параметров			
Среднее	79,40	126,52	72,00
Минимальное	96,62	103,66	81,85
Максимальное	70,89	155,06	75,10

Таблица 8

Группа умерших

Значение Y	Без учета ошибки	Максимальное с учетом ошибки	Минимальное с учетом ошибки
Среднее	15,90	153,15	-68,35
Минимальное	17,32	84,18	-3,37
Максимальное	-13,78	247,38	-223,66

Составим систему уравнений из уравнения (11) и $0 = \frac{d}{dx} E_{ab}(x) = x^3 + ax + b$.

Получим

$$\begin{cases} Y = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx \\ 0 = x^3 + ax + b \end{cases}$$

Пусть $X = 1$, тогда мы можем получить параметры a и b для каждого полученного значения Y . Обозначим:

- Y_1 – значение Y , полученное при средних X_i с отрицательными ошибками;
- Y_2 – значение Y , полученное при средних X_i с положительными ошибками;
- Y_3 – значение Y , полученное при средних X_i с нулевыми ошибками;
- Y_4 – значение Y , при минимальных X_i с отрицательными ошибками;
- Y_5 – значение Y , при минимальных X_i с положительными ошибками;
- Y_6 – значение Y , при минимальных X_i с нулевыми ошибками;
- Y_7 – значение Y , при максимальных X_i с отрицательными ошибками;
- Y_8 – значение Y , при максимальных X_i с положительными ошибками;
- Y_9 – значение Y , при максимальных X_i с нулевыми ошибками.

Тогда для катастрофы типа «сборка» имеем:

– для группы выживших:

- $Y_1 = 72,00, \quad a = -143,50, \quad b = 142,50.$
- $Y_2 = 126,50, \quad a = -252,50, \quad b = 251,50.$
- $Y_3 = 79,39, \quad a = -158,28, \quad b = 159,28.$
- $Y_4 = 81,85, \quad a = -163,20, \quad b = 162,20.$
- $Y_5 = 103,66, \quad a = -206,82, \quad b = 205,82.$
- $Y_6 = 96,62, \quad a = -192,74, \quad b = 191,74.$
- $Y_7 = 75,10, \quad a = -149,70, \quad b = 148,70.$
- $Y_8 = 155,06, \quad a = -309,62, \quad b = 308,62.$
- $Y_9 = 70,89, \quad a = -141,28, \quad b = 140,28.$

– для группы умерших:

- $Y_1 = -68,35, \quad a = 137,20, \quad b = -138,20.$
- $Y_2 = 153,15, \quad a = -305,80, \quad b = 304,80.$
- $Y_3 = 15,90, \quad a = -31,30, \quad b = 30,30.$
- $Y_4 = -3,37, \quad a = 7,24, \quad b = -8,24.$
- $Y_5 = 84,18, \quad a = -167,86, \quad b = 166,86.$
- $Y_6 = 17,32, \quad a = -34,14, \quad b = 33,14.$
- $Y_7 = -223,66, \quad a = -446,82, \quad b = 445,82.$
- $Y_8 = 247,38, \quad a = -494,26, \quad b = 493,26.$
- $Y_9 = -13,78, \quad a = 28,06, \quad b = -29,06.$

В качестве примера на рис. 1–4 приведены графические зависимости для многообразий катастроф для значений Y_1, Y_2 и Y_3 .

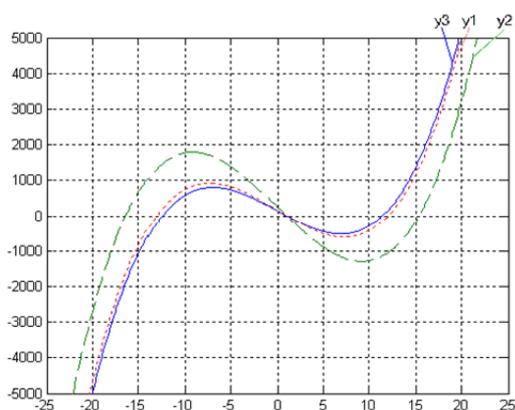


Рис. 1. Многообразие катастрофы «сборки» для выживших пациентов

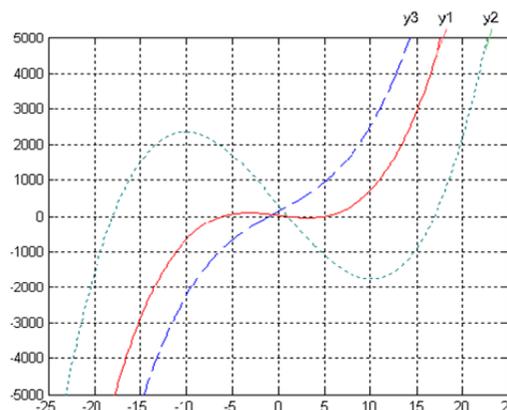


Рис. 2. Многообразие катастрофы «сборки» для умерших пациентов

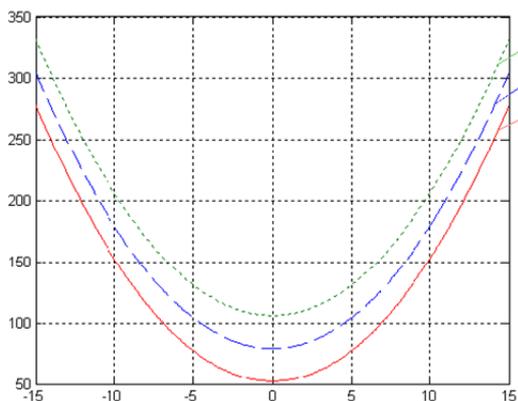


Рис. 3. Многообразие катастрофы «складки» для выживших пациентов

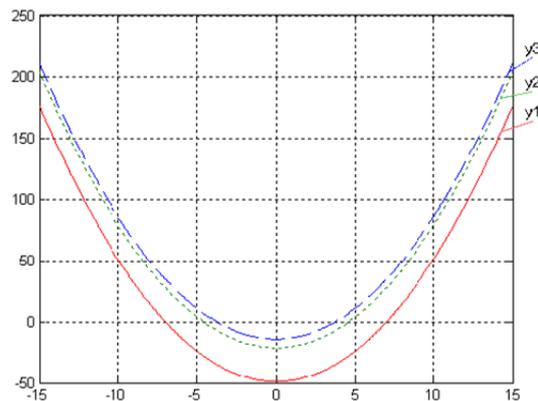


Рис. 4. Многообразие катастрофы «сборки» для умерших пациентов

Заключение

Таким образом, в статье отражены новые результаты по моделированию состояния пациентов с респираторным дистресс-синдромом дыхательных путей. Используются многомерный регрессионный анализ и метод теории бифуркации с катастрофами «складка» и «сборка».

Лечащий врач, имея модели типа выражений (4)–(9) и зная конкретные значения параметров состояния больного, может прогнозировать ход лечения, принимая необходимые меры в зависимости от значений характеристик, приведенных на рис. 1–4.

Список литературы

1. Здравовская, Ю. И. Линейные многофакторные модели оксигенотерапии больного респираторным дистресс-синдромом новорожденных / Ю. И. Здравовская, В. С. Микшина, В. А. Острейковский // Системный анализ и обработка информации в интеллектуальных системах : сб. науч. тр. кафедры информатики и вычислительной техники. – Сургут : Сургут. гос. ун-т, 2003. – № 2. – С. 27–35.
2. Острейковский, В. А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2004. – 312 с.
3. Острейковский, В. А. Регрессионные модели и временные ряды в экономике / В. А. Острейковский, В. С. Микшина. – Сургут : Сургут. гос. ун-т, 2002. – 56 с.
4. Постон, Т. Теория катастроф и ее приложения / Т. Постон, И. Стюарт. – М. : Мир, 1980. – 607 с.
5. Томпсон, Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике / Дж. М. Т. Томпсон. – М. : Мир, 1985. – 254 с.
6. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. – 3-е изд., доп. – М. : Наука, 1990. – 128 с.

УДК 075.8

Острейковский, В. А.

Математические модели регрессионного анализа и теории катастроф синдрома дыхательных путей / В. А. Острейковский // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 69–77.

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет,
628400, Ханты-Мансийский автономный округ –
Юрта, г. Сургут, проспект Ленина, 1.
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Аннотация. Дается пример использования интеллектуальных информационных систем в исследовании и разработке программ (устройств), использующих знания и процедуры логического вывода для решения сложноформализуемых задач, решение которых доступно системам, которые не только испол-

V. Ostrejkovski

Doctor of Technical Science, professor, the professor of
chair information theory and computer technology
Surgut state university,
628400, Surgut, prospect of Lenin, d. 1.
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Abstract. The example of use of intellectual information systems in research and development of the programs (devices) using knowledge and procedures of a logical conclusion for the solution of difficult and formalizable tasks which decision is available to systems which not only execute the set procedures is given, but on the ba-

няют заданные процедуры, но на основе метапроцедур поиска генерируют и используют процедурные знания для решения новых конкретных задач.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные системы, экспертные оценки, приобретение знаний, респираторный дистресс-синдром новорожденных.

sis of metaprocedures of search generate and use procedural knowledge for the solution of new specific objectives.

Key words: intellectual information systems, expert estimates, acquisition of knowledge, respiratory distress syndrome of newborns.

ПРЕДИКАТНАЯ АЛГЕБРА ВЫБОРА В МОДЕЛИРОВАНИИ МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

А. Н. ЯКИМОВ

Введение

При математическом моделировании микроволновых антенн со сложной пространственной конфигурацией, например зеркальных параболических антенн, с использованием метода конечных элементов (КЭ) появляется возможность численного решения задачи излучения антенны путем деления (декомпозиции) ее поверхности на КЭ [1]. В этом случае в пределах каждого из КЭ поверхностный ток $I(x, y, z)$ является функцией координат x , y и z декартовой системы (рис. 1).

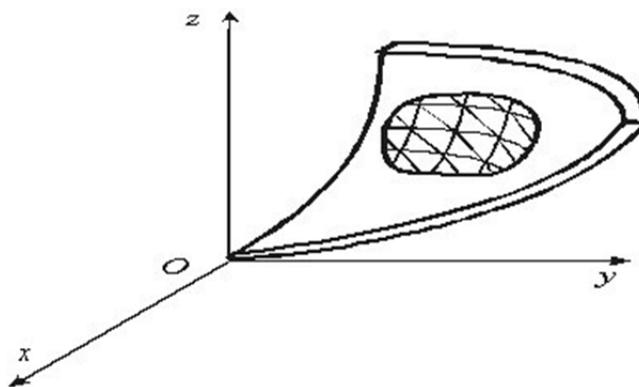


Рис. 1. Фрагмент излучающей поверхности антенны

В качестве КЭ разбиения излучающей поверхности целесообразно выбрать плоские треугольные элементы (см. рис. 1). При этом метод аппроксимации излучающей поверхности можно рассматривать как двумерное обобщение методов кусочно-линейной аппроксимации, а гладкая поверхность заменяется многогранной поверхностью аппроксимации. Применение такого метода позволяет обеспечить непрерывность искомой функции на границах между треугольниками, которая гарантируется равенством значений функции в совпадающих вершинах треугольников, а также сохранить независимость аппроксимации от расположения треугольников по отношению к глобальной системе координат $Oxyz$. При этом поверхность локально определяется значениями функции в вершинах треугольника и поэтому не изменяется при переопределении осей x , y и z [2].

Постановка задачи

Приближение дальней зоны позволяет считать, что все направления от начала локальных систем координат конечных элементов на точку наблюдения параллельны. Угловые же координаты точки наблюдения в локальных системах координат КЭ вследствие нелинейности излучающей поверхности оказываются различными. В связи с этим для определения электрических составляющих электромагнитного поля, создаваемого в точке наблюдения гладкой криволинейной излучающей поверхностью, особое значение следует придавать оценке характеристик рассеяния КЭ и ребер внешних КЭ, образующих кромку излучающей поверхности при их возбуждении плоской электромагнитной волной, падающей под произвольным углом. Следует также обратить внимание и на необходимость оценки пространственной ориентации электрических составляющих поля, создаваемых на идеально проводящих КЭ и ребрах кромки излучающей поверхности тангенциальной H_τ составляющей магнитного поля в глобальной системе координат, чтобы обеспечить

их векторное сложение в точке наблюдения. Компоненты общего поля получаются простым суммированием сферических компонент поля E_{ϕ_i} и E_{θ_i} каждого конечного элемента, E_{ϕ_j} и E_{θ_j} каждого краевого ребра кромки излучающей поверхности антенны относительно глобальной системы координат [1].

Правильность векторного сложения отдельных составляющих поля обеспечивается введением локальных систем координат с началами в центрах КЭ и учетом их ориентации относительно глобальной системы координат $Oxyz$. Сложность геометрической модели криволинейной излучающей поверхности антенны диктует необходимость совместной обработки геометрической, логической и аналитической информации при решении краевых задач излучения. В связи с этим перспективным оказывается использование в численных расчетах предикатной алгебры выбора [3–6].

Решение проблемы

В расчетах характеристик излучения микроволновой антенны по ее дискретной модели используется информация, имеющая специфику для отдельных участков излучающей поверхности. Учесть эту специфику наиболее эффективно можно введением логики предикатов, которая в отличие от логики высказываний проникает и в структуру самих предположений в смысле связи того, о чем идет речь (субъект) с тем, что говорится о данном предмете (предикат). Таким образом, язык логики предикатов лучше приспособлен для выражения логических связей между различными понятиями и утверждениями.

Известно [3], что n -местный предикат $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$, который является двузначной логической функцией, принимающей одно из двух значений – «истинно» (1) или «ложно» (0) в зависимости от конкретных значений, приписываемых ее аргументам – предметным переменным x_1, x_2, \dots, x_n из соответствующих областей определения, задаваемых множествами X_1, X_2, \dots, X_n , причем $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$. При замещении аргумента x_k (предметной переменной) его некоторым значением b (предметной постоянной) n -местный предикат $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ превращается в $(n-1)$ -местный предикат $P(x_1, \dots, x_{k-1}, b, x_{k+1}, \dots, x_n)$, который от переменной x_k уже не зависит. Таким образом, задавая численные значения предметных переменных, можно свести предикатную функцию к одноместному виду.

Из изложенных теоретических положений следует, что для составления предикатной функции $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и нахождения конкретных значений ее аргументов, обеспечивающих выполнение условия истинности необходимо:

- определить порядок n предикатной функции;
- задать предметные переменные x_1, x_2, \dots, x_n ;
- задать области определения X_1, X_2, \dots, X_n предметных переменных;
- обеспечить однозначность выполнения условия истинности, когда предикатная функция принимает значение 1;
- привести n -местную предикатную функцию $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ к одноместному виду;
- определить значение предметной переменной, при которой выполняется условие истинности.

Предикатный подход [3, 4] получил свое развитие в работах Л. И. Волгина [5, 6] по векторной комплементарной алгебре, частной реализацией которой является предикатная алгебра выбора (ПАВ).

В основе ПАВ лежит положение о том, что расширенный класс функций z порождается операциями суперпозиции

$$z = V_A(\mathbf{Y}) = a_1 y_1 + a_2 y_2 + \dots + a_n y_n, \quad (1)$$

где $V_A(\mathbf{Y})$ – символ скалярного произведения векторов \mathbf{A} и \mathbf{Y} ; $\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ – вектор весовых коэффициентов; $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ – вектор предметных переменных. При этом обязательным является выполнение условия комплементарности, в соответствии с которым

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1, \quad a_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Здесь весовые коэффициенты a_i являются двузначными предикатами, а элементарными функциями, воспроизводящими операции выбора одной из двух переменных, являются предикатные конъюнкция и дизъюнкция.

Таким образом, в соответствии с положениями ПАВ специфика отдельных участков излучающей поверхности антенны может быть задана вектором предметных переменных $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, элемент которого, соответствующий заданному участку поверхности, выбирается двузначным предикатом (весовым коэффициентом, равным 1), определяемым операциями конъюнкции или дизъюнкции.

Рассмотрим процедуру определения краевых условий возбуждения симметричной параболической антенны, вершина которой совпадает с началом декартовой системы координат (см. рис. 1), на примере КЭ, расположенного во втором квадранте (рис. 2).

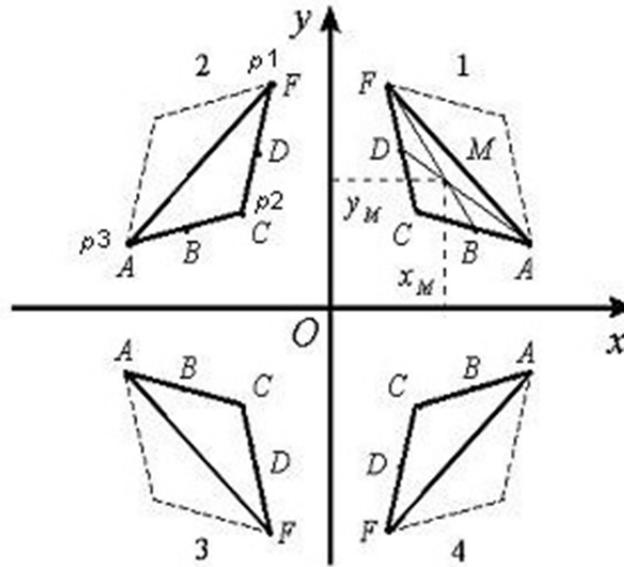


Рис. 2. К определению координат точки M

Нормаль \mathbf{n} к поверхности КЭ и проекция магнитной составляющей \mathbf{H}_i на эту поверхность ($\mathbf{H}_{i\tau}$) могут быть получены по координатам характерных точек модели: вершин треугольного КЭ и его центральной точки. Нормаль \mathbf{n} к плоскости, проходящей через вершины треугольника $p1$, $p2$ и $p3$, совместима с осью \bar{z} локальной системы координат КЭ, опишем ее пространственную ориентацию в системе $Oxyz$ известными [7] формулами

$$\bar{z}_x = \cos \alpha_x^{\bar{z}} = A_x / r_n, \quad \bar{z}_y = \cos \alpha_y^{\bar{z}} = A_y / r_n, \quad \bar{z}_z = \cos \alpha_z^{\bar{z}} = A_z / r_n, \quad (3)$$

где $\bar{z}_x, \bar{z}_y, \bar{z}_z$ – направляющие косинусы оси \bar{z} локальной системы координат $O\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ в глобальной системе $Oxyz$; $r_n = \pm \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$, причем знак перед корнем определяется знаком вектора нормали, опущенной из точки O на плоскость КЭ:

$$A_x = \begin{vmatrix} y_{p1} & z_{p1} & 1 \\ y_{p2} & z_{p2} & 1 \\ y_{p3} & z_{p3} & 1 \end{vmatrix}, \quad A_y = \begin{vmatrix} z_{p1} & x_{p1} & 1 \\ z_{p2} & x_{p2} & 1 \\ z_{p3} & x_{p3} & 1 \end{vmatrix}, \quad A_z = \begin{vmatrix} x_{p1} & y_{p1} & 1 \\ x_{p2} & y_{p2} & 1 \\ x_{p3} & y_{p3} & 1 \end{vmatrix},$$

$x_{p1} - x_{p3}, y_{p1} - y_{p3}, z_{p1} - z_{p3}$ – координаты вершин треугольника $p1, p2$ и $p3$.

Вектор оси \bar{y} определяется по координатам точек M и $p1$ в системе координат $Oxyz$:

$$\bar{y}_x = \cos \alpha_x^{\bar{y}} = \frac{x_{p1} - x_M}{r_{\bar{y}}}; \quad \bar{y}_y = \cos \alpha_y^{\bar{y}} = \frac{y_{p1} - y_M}{r_{\bar{y}}}, \quad \bar{y}_z = \cos \alpha_z^{\bar{y}} = \frac{z_{p1} - z_M}{r_{\bar{y}}}, \quad (4)$$

где $r_{\bar{y}} = \sqrt{(x_{p1} - x_M)^2 + (y_{p1} - y_M)^2 + (z_{p1} - z_M)^2}$.

Вектор оси \bar{x} может быть найден как результат векторного произведения $\bar{x} = [\bar{y} \times \bar{z}]$:

$$\bar{x}_x = \cos \alpha_x^{\bar{x}} = \begin{vmatrix} \bar{y}_y & \bar{y}_z \\ \bar{z}_y & \bar{z}_z \end{vmatrix}; \quad \bar{x}_y = \cos \alpha_y^{\bar{x}} = \begin{vmatrix} \bar{y}_z & \bar{y}_x \\ \bar{z}_z & \bar{z}_x \end{vmatrix}, \quad \bar{x}_z = \cos \alpha_z^{\bar{x}} = \begin{vmatrix} \bar{y}_x & \bar{y}_y \\ \bar{z}_x & \bar{z}_y \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Координаты точки M определяются в результате совместного решения уравнений [8] медиан AD и EB рассматриваемого треугольника (см. рис. 2) и описываются следующими выражениями:

$$x_M = (k_A + k_C \cdot x_B - k_B \cdot x_A) / (k_C - k_B), \quad (6)$$

где $k_A = (y_A - y_B)(x_D - x_A)(x_F - x_B)$; $k_B = (y_D - y_A)(x_F - x_B)$; $k_C = (y_F - y_B)(x_D - x_A)$;

$$y_M = y_A + (x_M - x_A)(y_D - y_A) / (x_D - x_A); \quad (7)$$

$$z_M = z_A + (x_M - x_A)(z_D - z_A) / (x_D - x_A). \quad (8)$$

Координаты точек A , C и F , являющиеся вершинами треугольника (см. рис. 2), оказываются определенными еще на этапе конечно-элементного разбиения поверхности [1], а для точек B и D они могут быть получены усреднением координат вершин, принадлежащих соответствующей стороне треугольника: $x_B = (x_A + x_C) / 2$; $x_D = (x_C + x_F) / 2$ и т.д.

Зная направляющие косинусы вектора \mathbf{H}_i и осей локальной системы координат $O\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ относительно глобальной $Oxyz$, легко найти его проекции на оси локальной системы $O\bar{x}\bar{y}\bar{z}$:

$$\begin{cases} H_{\bar{i}\bar{x}} = \cos \alpha_{\bar{x}}^{H_i} = \cos \alpha_x^{H_i} \cdot \cos \alpha_x^{\bar{x}} + \cos \alpha_y^{H_i} \cdot \cos \alpha_y^{\bar{x}} + \cos \alpha_z^{H_i} \cdot \cos \alpha_z^{\bar{x}}, \\ H_{\bar{i}\bar{y}} = \cos \alpha_{\bar{y}}^{H_i} = \cos \alpha_x^{H_i} \cdot \cos \alpha_x^{\bar{y}} + \cos \alpha_y^{H_i} \cdot \cos \alpha_y^{\bar{y}} + \cos \alpha_z^{H_i} \cdot \cos \alpha_z^{\bar{y}}, \\ H_{\bar{i}\bar{z}} = \cos \alpha_{\bar{z}}^{H_i} = \cos \alpha_x^{H_i} \cdot \cos \alpha_x^{\bar{z}} + \cos \alpha_y^{H_i} \cdot \cos \alpha_y^{\bar{z}} + \cos \alpha_z^{H_i} \cdot \cos \alpha_z^{\bar{z}}. \end{cases} \quad (9)$$

Модуль тангенциальной составляющей на поверхности КЭ при этом равен

$$H_{i\tau} = \sqrt{H_{\bar{i}\bar{x}}^2 + H_{\bar{i}\bar{y}}^2}, \quad (10)$$

а ее проекции на оси локальной системы могут быть определены по выражениям

$$\begin{aligned} H_{i\tau\bar{x}} &= \cos \alpha_{\bar{x}}^{H_{i\tau}} = H_{\bar{i}\bar{x}} / H_{i\tau}; \quad H_{i\tau\bar{y}} = \cos \alpha_{\bar{y}}^{H_{i\tau}} = H_{\bar{i}\bar{y}} / H_{i\tau}; \\ H_{i\tau\bar{z}} &= \cos \alpha_{\bar{z}}^{H_{i\tau}} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Полученных данных оказывается достаточно, чтобы определить вектор плотности поверхностного тока $\mathbf{J}_s = 2[\mathbf{n} \times \mathbf{H}_{i\tau}]$ в локальной системе $O\bar{x}\bar{y}\bar{z}$, а с использованием формул (3)–(5) и в глобальной системе координат $Oxyz$.

Краевые условия возбуждения кромки излучающей поверхности определяются исходя из кусочно-линейной аппроксимации ее геометрии, которая полностью определена координатами вершин крайних КЭ. Зная координаты вершин крайних КЭ, принадлежащих кромке, легко найти пространственную ориентацию ее внешних ребер \mathbf{L} и проекции \mathbf{H}_i на эти ребра, поэтому задача в рассматриваемом аспекте не представляет дополнительного интереса и в данной статье не рассматривается. Таким образом, краевые условия возбуждения КЭ можно считать определенными.

Однако чтобы воспользоваться полученными формулами для определения краевых условий на КЭ, расположенных в любом из квадрантов декартовой системы координат $Oxyz$, нужно учитывать особенность ориентации КЭ в каждом из них (см. рис. 2). Условия комплементарности $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$ здесь могут быть легко выполнены, где $a_i \in \{0,1\}$ – весовые коэффициенты квадрантов, каждый из которых равен 1 только в своем квадранте, а в других квадрантах равен 0; $i = 1, 2, \dots, n$; $n = 4$.

Коэффициенты для квадрантов декартовой системы координат (см. рис. 2) формируются с учетом разбиения излучающей поверхности относительно ее центра и сканирования матрицы координат излучающей поверхности слева направо и сверху вниз:

$$\begin{cases} a_1 = (m - I - i < 0) \wedge (K - 1 - k \geq 0), & a_2 = (I - 1 - i \geq 0) \wedge (K - 1 - k \geq 0), \\ a_3 = (I - 1 - i \geq 0) \wedge (n - K - k < 0), & a_4 = (m - I - i < 0) \wedge (n - K - k < 0), \end{cases} \quad (12)$$

где i, k – номера строк и столбцов матрицы координат узловых точек, возникающих при разбиении излучающей поверхности антенны на КЭ взаимно перпендикулярными плоскостями; I, K – номера строк и столбцов, описывающих узловые точки горизонтальной и вертикальной осей симметрии антенны; m, n – максимальные номера строк и столбцов.

Тогда операция суперпозиции элементов вектора предметных переменных $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ с этими весовыми коэффициентами позволит подключать их независимо для каждого квадранта и получить результат G :

$$G = u_1 a_1 + u_2 a_2 + \dots + u_n a_n. \quad (13)$$

В качестве предметных переменных здесь могут выступать геометрические параметры КЭ и ребер, образующих края излучающей поверхности, характерные только для заданных квадрантов. Так, например, для определения по формулам (6)–(8) координат центра КЭ M используется информация матриц координат узловых точек излучающей поверхности, получаемых при ее конечно-элементном разбиении. Чтобы избежать ошибок расчета x_M , необходимо параметрам x_A, x_C и x_F присваивать x с индексами, соответствующими именно анализируемому квадранту. Аналогичные задачи решаются также при расчете y_M и z_M .

Анализ результатов

Пространственная диаграмма направленности зеркальной параболической антенны диаметром 1 м с фокусным расстоянием 0,35 м и уровнем поля на краю зеркала – 10 дБ относительно максимума, рассчитанная в оболочке MatLAB с использованием предикатной алгебры выбора и предложенной методики, приведена на рис. 3.

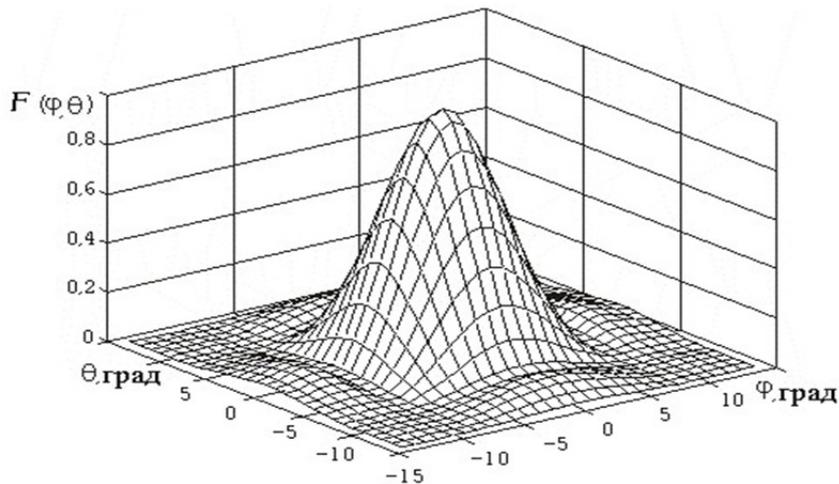


Рис. 3. Пространственная диаграмма направленности антенны

Расчеты показали высокую точность такой математической модели антенны при разбиении ее излучающей поверхности на плоские треугольные КЭ с равномерным шагом, равным половине длины волны, и целесообразность ее использования в синтезе микроволновых антенн.

Заключение

Близость полученных результатов к типичным для данного класса антенн указывает на перспективность использования предикатной алгебры выбора в проектировании микроволновых антенн со сложной пространственной конфигурацией для совместной обработки геометрической, логической и аналитической информации при решении краевых задач излучения.

Список литературы

1. Якимов, А. Н. Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий : моногр. / А. Н. Якимов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 260 с.
2. Сильвестер, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари. – М. : Мир, 1986. – 229 с.
3. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера / В. П. Сигорский. – Киев : Техника, 1977. – 768 с.
4. Рвачев, В. Л. Проблемно-ориентированные языки и системы для инженерных расчетов / В. Л. Рвачев, А. Н. Шевченко. – Киев : Техника, 1988. – 197 с.
5. Волгин, Л. И. Векторная комплементарная алгебра и ее применения : две лекции по курсу «Логические основы и модели нейронных сетей» / Л. И. Волгин. – Ульяновск : УлГТУ, 1996. – 52 с.
6. Волгин, Л. И. Элементарный базис комплементарной алгебры: комплементарный релятор / Л. И. Волгин // Проектирование и технология электронных средств. – 2001. – № 1. – С. 10–11.
7. Корн, Г. Справочник по математике: для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.
8. Якимов, А. Н. Использование предикатной алгебры выбора в моделировании микроволновых антенн / А. Н. Якимов // Надежность и качество – 2012 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 277–280.

УДК 621.391.677: 519.711.3

Якимов, А. Н.

Предикатная алгебра выбора в моделировании микроволновых антенн сложной конфигурации / А. Н. Якимов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 78–83.

Якимов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет,
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(8412) 56-43-46
E-mail: y_alder@mail.ru

Аннотация. Показана возможность и перспективность использования предикатной алгебры выбора в моделировании микроволновых антенн, имеющих сложную пространственную конфигурацию. Рассмотрены процедура и результаты такого использования для зеркальной параболической антенны.

Ключевые слова: антенна, моделирование, предикатная алгебра.

A. Yakimov

Doctor of Technical Science, professor,
department of construction
and the production of radio equipment
Penza state university,
440026, Penza, Red street, 40.
(8412) 56-43-46
E-mail: y_alder@mail.ru

Abstract. Opportunity and prospects of use of predicate algebra of a choice in modeling of the microwave antennas having a difficult spatial configuration is shown. Procedure and results of such use for the mirror parabolic antenna are considered.

Key words: antenna, modeling, predicate algebra.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 629.05

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ

К. И. Бушмелева, С. У. Увайсов

Как показывает практика, при добыче, транспортировке и переработке природного газа возникают утечки загрязняющих веществ, в частности метана. Причиной утечек являются различные дефекты, возникающие вследствие коррозии стенок трубопроводов из-за повреждений изоляционных покрытий, нарушений в сварных соединениях и другие дефекты. Своевременное обнаружение утечек газа из объектов газотранспортной сети (ГТС) позволит уменьшить риск возникновения аварийных ситуаций.

В связи с этим появился комплекс научно-технических проблем по обеспечению надежности газопроводов, устойчивости их работы и безопасности, оценкам остаточного ресурса и рисков. Основным направлением деятельности для решения этих проблем является совершенствование системы мониторинга и управления техническим состоянием объектов ГТС на основе развития и создания новых методов и средств неразрушающего контроля и технического диагностирования.

В настоящее время существуют различные устройства и методы диагностирования газопроводов, которые отличаются принципом действия, чувствительностью, областью применения и др. Метрически, в смысле масштабов охвата географической территории прокладки сети, все методы условно можно разделить на методы локального и глобального диагностирования [1].

Однако огромная протяженность и разветвленность ГТС в России и в странах ближнего зарубежья, прохождение газопроводов по территориям с неблагоприятными климатическими и рельефно-ландшафтными условиями, а также отсутствие развитой и разветвленной системы коммуникаций, существенно ограничивают или делают невозможным тотальное применение локальных методов и средств диагностирования, например, таких как акустический, магнитный, оптический и др.

Более эффективными с точки зрения оперативности обследования протяженных участков магистрали являются глобальные – аэрокосмические методы (АКМ), которые с помощью различных летательных аппаратов могут дистанционно осуществлять мониторинг подстилающей поверхности средствами фото-, видеонаблюдения, а также устройствами тепловизионного, радиолокационного или лазерного зондирования. Обладая бесспорным преимуществом по масштабам охватываемой территории, АКМ уступают локальным мобильным и стационарным средствам ди-

агностирования по точности и достоверности получаемой информации о характере и месте дефекта.

В результате возникает задача объединения методов и средств локального и глобального диагностирования в единую систему мониторинга ГТС и получения на этой основе эмерджентного эффекта. Решить эту задачу позволили передовые достижения в области телекоммуникаций, в частности использование сети транкинговых средств связи.

Организация диспетчерской и внутриобъектной связи основного персонала и ремонтно-восстановительных бригад чаще всего осуществляется с помощью сети транкинговых средств, которые служат объединяющим звеном деятельности всех предприятий газотранспортной отрасли, предоставляя оперативную связь и передавая технологическую информацию.

Информационно-телекоммуникационная система (ИТС) мониторинга состояния объектов ГТС реализована в соответствии с требованиями цифрового открытого стандарта TETRA, она позволяет объединить в едином пространстве территориально разнесенные информационно-измерительные ресурсы, системы и сети, основные элементы наземной и аэрокосмической инфраструктуры транкинговой радиосвязи и абонентских радиостанций, средства диагностирования и позиционирования, расположенные на различных носителях, и обеспечивает централизованное управление данными ресурсами в целях повышения эффективной работы Единой системы газоснабжения (ЕСГ) России.

Целесообразность внедрения транкинговых средств в систему мониторинга обусловлена объективными преимуществами: многозоновым покрытием обслуживаемых территорий; надежностью; оперативностью; качеством сигнала; защищенностью от несанкционированного доступа; наличием беспроводной телефонии и телеметрии и дополнительными сервисами.

В состав системы мониторинга входят четыре основных сегмента:

– объект диагностирования – газотранспортная система, представляющая собой сеть 1–6-ниточных магистральных газопроводов, отводов, компрессорных установок и других сооружений;

– аэрокосмический сегмент – космические и авиационные летательные аппараты, оснащенные бортовым пилотажно-навигационным оборудованием;

– пользовательский сегмент – средства глобального и локального диагностирования, а также телекоммуникационные устройства, осуществляющие прием и передачу информации по различным каналам связи;

– наземный сегмент – основные и телекоммуникационные территориально разнесенные центры управления, станции сопряжения, стационарные и мобильные пункты, предназначенные для накопления и передачи всех видов информации, включая телеметрическую, позиционную.

Управление данной системой основано на базе информационно-телекоммуникационных технологий, позволяющих осуществлять сбор, отображение, обработку, анализ, прогнозирование и распространение информации посредством программно-аппаратных комплексов.

Основной задачей комплексного диагностирования газопроводов является своевременное выявление изменений его технического состояния с использованием технологии непрерывной информационной поддержки на протяжении всего жизненного цикла: при условии взаимодействия с окружающей средой, оценки остаточного ресурса, выбора наиболее эффективных методов диагностирования и средств оперативной передачи информации для обеспечения безопасной эксплуатации и надежной работоспособности ГТС.

Данная технология предполагает переход от проверки и оценки запасов прочности и работоспособности газопровода к проверке его исправности на стадии эксплуатации и ремонта. В ее основе лежит методология диагностического обеспечения объектов ГТС устройством дистанционного зондирования (УДЗ) [2] с применением средств профессиональной мобильной радиосвязи, которая в свою очередь поддерживается автоматизированной системой обработки и регистрации данных.

Управление системой мониторинга объектов ГТС осуществляется информационно-телекоммуникационной системой «Газ», построенной на базе сервис-ориентированных и геоинформационных технологий, которые являются наиболее перспективными за счет реализации мобильных компонентов, повышающих степень распределенности и интеграции ИТС с другими информационными системами газотранспортной отрасли.

Система «Газ» имеет модульную архитектуру, настраиваемую под специфичные требования пользователя, взаимосвязь осуществляется посредством использования хранилища данных.

Основой системы является подсистема «Магистральный газопровод», который позволяет вводить, отображать, осуществлять поиск и структурировать все виды географических, пространственных и любых других данных об объектах сети.

Подсистема «Диагностика и мониторинг» предназначена для объединения различных данных по обследованиям газопроводов средствами локального и глобального диагностирования. Составляющими компонентами данной подсистемы является комплекс программ: «Оператор ЛУГ», «Эксперт ЛУГ», «Калибровка ЛУГ», разработанный непосредственно для осуществления обработки и анализа результатов проведения вертолетных обследований на предмет выявления утечек газа из газопроводов УДЗ и принятия оперативного решения о присвоении категории выявленным утечкам газа.

Анализ собранных данных об обстановке на объектах ГТС производится персоналом посредством программы «Оператор ЛУГ» [3], построенной на базе геоинформационных технологий, которая призвана объединить всю полученную информацию по авиационному обследованию газопроводов УДЗ для удобного хранения в базе данных, получения отчетов и последующего ее использования при прогнозировании событий.

Программа принятия оперативного решения «Эксперт ЛУГ» [4] позволяет присваивать различные категории утечкам газа из магистралей, на основе анализа данных, полученных при обследовании УДЗ, для повышения эффективности работы и снижения нагрузки оператора, принимающего решения.

По результатам анализа формируется предложение о проведении дополнительных работ по локальному диагностированию зарегистрированных утечек газа, которые передаются в центр управления и принятия решения в режиме реального времени транкинговыми средствами связи.

Для обеспечения достоверности и заданной точности информации, получаемой при дистанционном зондировании, были рассмотрены алгоритмы построения калибровочных функций на основе регрессионных моделей ИСО и РМГ, которые в свою очередь были заложены в универсальную методику калибровки измерительной системы локатора и реализованы на базе программного комплекса [5], позволяющего исключить погрешности, связанные с неправильным выбором вида калибровочной функции, и снизить затраты времени на выполнение калибровки за счет автоматизации процессов расчетов.

Подсистема «Мобильный» обеспечивает доступ к системе при полевых и авиационных работах, посредством использования устройств транкинговой связи.

Система «Газ» позволяет решать вопросы экологического мониторинга, диагностики, капитального ремонта и реконструкции технологических объектов ГТС.

Таким образом, достоинством ИТС системы мониторинга объектов ГТС является то, что она позволяет организовать и автоматизировать процесс сбора и обработки информации с территориально распределенной сети газотранспортных и подвижных объектов, оснащенных средствами локального и глобального диагностирования и приемопередающими устройствами, использующими различные каналы связи, с одновременным отображением на электронной карте системы «Газ» текущего положения и состояния объектов в режиме реального времени, а также предлагает решения по дополнительному обследованию, в случае выявления отклонений от норм по техническому состоянию объектов. И на этой основе, возможно, осуществлять оперативное диагностирование и управление состоянием газотранспортных объектов посредством принятия необходимых мер по устранению и предотвращению дефектов и утечек, что в свою очередь направлено на решение задач эффективной и безаварийной эксплуатации ЕСГ России.

Список литературы

1. Бушмелева, К. И. Анализ методов и средств диагностирования магистральных газопроводов / К. И. Бушмелева, И. И. Плюснин, С. У. Увайсов // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 7. – С. 29–37.
2. Бушмелева, К. И. Авиационный программно-аппаратный диагностический комплекс мониторинга магистральных газопроводов / К. И. Бушмелева, И. И. Плюснин // Измерительная техника. – 2009. – № 2. – С. 41–44.
3. Бушмелева, К. И. Автоматизированное рабочее место оператора локатора утечек газа / К. И. Бушмелева, И. И. Плюснин, П. Е. Бушмелев // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 5. – С. 115–119.
4. Бушмелева, К. И. Автоматизированная геоинформационная система мониторинга технического состояния магистральных газопроводов / К. И. Бушмелева, И. И. Плюснин // Информационные технологии. – 2009. – № 5. – С. 68–72.
5. Бушмелева, К. И. Специализированный пакет программ для калибровки измерительных приборов / К. И. Бушмелева, Е. А. Яценко // Информационные технологии. – 2010. – № 10. – С. 64–67.

УДК 629.05

Бушмелева, К. И.

Система мониторинга газотранспортных объектов / К. И. Бушмелева, С. У. Увайсов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 84–87.

Бушмелева Кия Иннокентьевна

доктор технических наук, доцент,
заведующая кафедрой,
Сургутский государственный университет,
628400, Ханты-Мансийский АО,
г. Сургут, проспект Ленина, 1.
(346) 276-29-00
E-mail: bkiya@yandex.ru

Увайсов Сайгид Увайсович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиоэлектроники
и телекоммуникаций Московского института
электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ),
109028, г. Москва, Большой Трехсвятительский пер, 3.
E-mail: uvaysov@yandex.ru

Аннотация. Дается методика диагностирования утечки загрязняющих веществ, возникающей при транспортировке и переработке природного газа. Показано, что основной задачей комплексного диагностирования газопроводов является своевременное выявление изменений его технического состояния с использованием технологии непрерывной информационной поддержки на протяжении всего жизненного цикла: при условии взаимодействия с окружающей средой, оценкой остаточного ресурса, выбором наиболее эффективных методов диагностирования и средств оперативной передачи информации для обеспечения безопасной эксплуатации и надежной работоспособности газотранспортной сети. Приводится структура информационно-телекоммуникационной системы мониторинга состояния объектов газотранспортной сети.

Ключевые слова: мониторинг, диагностика, газотранспортная сеть, информационные системы, программно-аппаратный комплекс.

K. Bushmeleva

Doctor of Technical Science, docent,
the managing of department,
Surgut state university.
628400, Khanty Mansiysk AO, Surgut region, Surgut,
prospect of Lenin, 1.
(346) 276-29-00
E-mail: bkiya@yandex.ru

S. Uvisov

Doctor of Technical Science, professor,
the managing of department radio electronics
and the tele-communications MIEM NIU VSE,
109028, Moscow, Large Trekhsvyatitelskiy, 3.
E-mail: uvaysov@yandex.ru

Abstract. The technique of diagnosing of leakage of the polluting substances arising at transportation and processing of natural gas is given. It is shown that the main objective of complex diagnosing of gas pipelines is timely identification of changes of its technical condition with use of technology of continuous information support throughout all life cycle: on condition of interaction with environment, an assessment of a residual resource, a choice of the most effective methods of diagnosing and means of operational information transfer for ensuring safe operation and reliable operability of a gas transmission network. The structure is given is information-telecommunication system of monitoring of a condition of objects of a gas transmission network.

Key words: monitoring, diagnostics, gas transmission network, information systems, hardware-software complex.

К ПРОБЛЕМЕ АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

А. В. Бурлаченко, В. Н. Писарев

Аттестация испытательного оборудования (ИО) проводится по программам и методикам, разработанным в соответствии с государственными и отраслевыми нормативно-техническими документами (НТД) на методы и средства аттестации или по методикам аттестации предприятий, применяющих это оборудование. В табл. 1 приведен перечень НД, содержащих методики аттестации ИО.

Таблица 1

Состав нормативной документации

Номер НД	Наименование НД
ГОСТ 25051.2–82	СГИП. Камеры тепла и холода испытательные. Методы аттестации
РД 50-364–82	Методика аттестации климатермобарокамер (повышенной и пониженной температур, влажности, пониженного давления)
РД 50-539–85	Методические указания. СГИП. Методы и средства аттестации баро- и термобарокамер
ОСТ 11.0373–87	Камеры влажности и грибообразования. Методы и средства аттестации
ОСТ 1 02705–90	Установки испытательные вибрационные. Порядок проведения аттестации в режиме воспроизведения широкополосной случайной вибрации
ОСТ 3-4162–82	Термобарокамеры. Методы и средства аттестации
ГОСТ 25051.3–83	СГИП. Установки испытательные вибрационные электродинамические. Методы и средства аттестации
ГОСТ 25051.4–83	СГИП. Установки испытательные вибрационные электродинамические. Общие технические условия
РД 50-589–85	Методические указания. СГИП. Установки для испытаний на воздействие транспортной тряски. Методы и средства аттестации
РД 50-590–85	Методические указания. СГИП. Установки для испытаний на воздействие удара. Методы и средства аттестации
ОСТ 11.068.024–78	Стенды вибрационные испытательные. Методы и средства аттестации
МИ 49-75	Методика аттестации ударных испытательных установок

Как следует из табл. 1, приведенный перечень НД относится к 1975–1990 гг. разработки, некоторые из них дублируют друг друга, но в целом они могут использоваться для целей аттестации ИО. Практически отсутствуют НД по аттестации камер пыли, солнечного излучения, соляного тумана, центрифуг и др.

Пробел в области совершенствования методологии аттестации ИО пытается восполнить технический комитет по стандартизации ТК 341 «Внешние воздействия» (не свойственный ему вид деятельности), который путем переработки стандартов МЭК группы 60068 пытается навязать отечественной промышленности в плохой редакции и не согласуемые с практикой, ГОСТы по методам аттестации ИО.

Рассмотрим на конкретных примерах подтверждение указанного вывода.

В настоящее время ТК 341 разработаны:

1. ГОСТ Р 53618–2009/МЭК 60068-3-5:2001 «Требования к характеристикам камер для испытаний технических изделий на стойкость к внешним воздействующим факторам. Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний на стойкость к воздействию температуры».

2. ГОСТ Р 53616–2009/МЭК 60068-3-6:2001 «...Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний на стойкость к воздействию влажности».

3. ГОСТ Р 54083–2010/МЭК60068-3-7:2001 «...Методы аттестации камер (с загрузкой) для испытаний на стойкость к воздействию температуры».

4. ГОСТ Р 54082–2010/МЭК 60068-3-11:2007 «...Методы обработки результатов аттестации».

5. ГОСТ Р 54436–2011 «...Методы аттестации камер (с загрузкой) для испытаний на стойкость к воздействию влажности воздуха в циклическом режиме».

6. ГОСТ Р 54437–2011 «...Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний на стойкость к воздействию давлением воздуха».

Анализ вышеуказанных стандартов позволил выделить следующие общие недостатки:

1. Название ГОСТов ограничивает их область деятельности: «камеры для испытаний технических изделий на *стойкость* к внешним воздействующим факторам», в то время, как камеры тепла и влаги используются для определения показателей устойчивости и прочности изделий при воздействии внешних факторов, показателей их надежности, для проведения технологических тренировок и пр.

2. Во введениях к стандартам ошибочно указано, что их требования (аттестация камер) относятся к вопросам безопасности, обеспечиваемой стойкостью технических изделий к внешним воздействующим факторам при эксплуатации, транспортировании и хранении.

В частности, в приказах Росстандарта об утверждении указанных ГОСТов отмечается: «*Утвердить для добровольного применения стандарт Российской Федерации...*». Например, см. приказ Росстандарта от 28.09.11 № 383 об утверждении ГОСТ Р 54436–2011.

3. Во введении к стандартам также неправомерно указано, что «Настоящий стандарт является частью комплекса стандартов «Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий» (комплекс ГОСТ 30630)» и по тексту добавлены ссылки на другие ГОСТы этого же комплекса, например, ГОСТ Р 15150–69, ГОСТ Р 51368, ГОСТ 24346.

Указанное положение неверно, поскольку методы аттестации камер не могут принадлежать к какому-либо комплексу стандартов. Они используются для оценки соответствия систем, комплексов и образцов ВВТ, радиоэлектронных средств вооружения (КС «Мороз-6»), электрорадиоизделий (КС «Климат-7»), для проведения испытаний продукции по отраслевым НД (авиакосмическая, ракетная и любая другая техника), в частности, ГОСТ Р 25051.2 «Система государственных испытаний продукции. Камеры тепла и холода испытательные. Методы аттестации» был общим.

4. Первый, третий и четвертый из вышеуказанных стандартов относятся к методам аттестаций камер тепла и холода. Эту задачу в отечественной практике ранее решал ГОСТ 25051.2–82, который подтверждал свою жизненную необходимость практически в течение 30 лет. Конечно, он требовал актуализации, особенно в части уточнения нормативных ссылок и рекомендаций по использованию средств измерений, но не замены в худшей редакции.

Авторы же указанных выше стандартов в качестве аргумента необходимости разработки новых стандартов и отмены ГОСТ 25051.2–82 выдвинули наличие надуманной проблемы, «вызванной различиями в способах измерения и регулировки температуры, применявшихся в камерах, выпускаемых три-четыре десятилетия назад, и в камерах современной конструкции». На методы аттестации эта «проблема» не может оказывать влияние. Если в ИО применяются новые системы измерения и регулировки температуры и выдвигаются повышенные требования по точности поддержания температуры, то необходимо применять средства измерений при аттестации повышенной точности.

Так, в п. 3.2 ГОСТ 25051.2–82 отмечено, что «Предельно допускаемая погрешность измерений температуры воздуха в камерах с помощью средств измерений, применяемых при аттестации, не должна превышать 1/5 отклонения температуры от заданного (нормированного) значения, установленного в НТД или ЭД на камеры и (или) в НТД или РД на методы испытаний продукции и регламентированного в ПА». Испытатель сам выбирает средства измерений, чтобы реализовать это требование.

Это же положение, но в худшей редакции и с грубыми ошибками продублировано в п. 5.1.3 ГОСТ Р 53618–09: «Предельно допустимая погрешность измерений температуры воздуха в камерах с помощью средств измерений, *специально применяемых при аттестации, не должна превышать одной трети* от установленного в НД или ЭД на камеры и (или) в НД на методы испы-

таний, применяемые при аттестации, *не должна превышать одной пятой* от установленного в НД или ЭД на камеры и (или) в НД на методы испытаний продукции и регламентированного в ПА отклонения температуры от заданного значения. Так, какое же значение принимать в качестве погрешности измерения 1/3 или 1/5?

5. Тексты стандартов содержат не используемые в отечественной практике терминологию (градиент, вариация и др.) и характеристики камер. При этом стандарты содержат значительное количество ошибок, редакционных неточностей, нечеткое изложение последовательности действий, а также положения, не согласуемые с методологией испытаний и практикой аттестации ИО.

Например, в трех новых стандартах авторы приводят три различных определения **градиента**:

– в п. 3.2.18 ГОСТ Р 53616–2009 **градиент относительной влажности определен как** «разность между максимальным и минимальным средними значениями относительной влажности (после стабилизации) *в двух любых точках* полезного объема камеры *в любой интервал времени для конкретного режима испытаний*». Очевидно, что средние значения не могут быть получены в любой интервал времени (это мгновенные значения);

– в п. 3.2.16 ГОСТ Р 53618–2009 определение **градиент температуры звучит иначе**: «разность между максимальным и минимальным средними значениями температуры (после стабилизации) *в двух любых точках* полезного объема камеры» (заметьте, что центр полезного объема камеры не исключен);

– а в ГОСТ Р 54082–2010 (п. 4.2.1.2) в пояснении к формуле определения градиента содержит 3-ю редакцию, как «разность между наибольшим средним и наименьшим средним значениями температуры *в точках полезного объема камеры из числа определенных по п.4.2.1.1*» (опять замечьте, что центр полезного объема камеры тоже не исключен).

Видно, что все три определения отличаются. Эти определения также не стыкуются с пояснением градиента, приведенным на рис. 2 ГОСТ Р 53618, поскольку оно исключает учет результатов измерений в центре полезного объема камеры.

В ГОСТ Р 53616 также приведен ряд терминов, которые не согласуются ни с терминологией в этой области, ни с практикой их применения (табл. 2).

Таблица 2

Терминология по ГОСТ Р 53616

Термин	Определение термина
3.2.1. Камера для испытаний на воздействие влажности	Объем, <i>или пространство</i> , в некоторой части которого могут быть достигнуты значения влажности в диапазоне, установленном в ТУ или ЭД на камеру и (или) в методах испытаний на воздействие влажности
3.2.12. Колебания относительной влажности	Разности между максимальным и минимальным значениями относительной влажности, вычисленные для данного температурного датчика (<i>не верно, при чем здесь температурный датчик. Колебания должны характеризоваться амплитудой и частотой, – авт.</i>)
3.2.25. Загрузка	Образец или макет образца, помещаемый в камеру при испытании (<i>не верно, это же действие, – авт.</i>)

6. Имеет место несогласование ссылочных документов по одному и тому же вопросу в разных стандартах. Так, в п. 5.1.1 ГОСТ Р 53618 указано, что «В качестве датчиков температуры обычно применяют термометры сопротивления (ГОСТ Р 6651) или термопары (ГОСТ 6651)», а в п. 5.1.1 ГОСТ Р 53616 – «В качестве датчиков температуры обычно применяют термометры сопротивления (ГОСТ Р 8.625) или термопары (ГОСТ Р 8.585).

7. **Скорость изменения температуры** по ГОСТ Р 53618 определяют при измерении времени достижения температуры от 10 до 90 % диапазона температур по НД или ЭД на камеру (при нагревании) и от 90 до 10 % диапазона температур (при охлаждении). Отсутствие учета диапазона температур за пределами менее 10 % и более 90 % не позволяет вычислить такую характеристику камеры, как время достижения предельного значения температуры от базового значения температуры.

При этом, если в стандарте МЭК 60068-3-5:2001 приведен только один метод измерения скорости изменения температуры в камере (в окончательной редакции ГОСТ Р 53618 также был приведен один метод), то в утвержденной редакции стандарта появились еще два метода в приложении А. Рассчитанные значения скорости изменения температуры в камере для всех трех методов, по данным, приведенным на рис. 5 ГОСТ Р 53618, отличаются в 1,2–1,6 раза.

8. В ГОСТ Р 53616 приведены надуманные новые характеристики камеры влаги: *вариация и градиент приведенной продолжительности влагозащиты*, которые в первой редакции проекта ГОСТа отсутствовали. Следует отметить, что такая характеристика, как влагозащита, является принадлежностью к конкретной продукции (печатная плата, радиоэлектронное средство и др.), но никак не камеры.

И таких примеров имеется множество.

Все это в сочетании с изложением методов определения характеристик камер (ГОСТ Р 53616, ГОСТ Р 53618 и ГОСТ Р 54083) и методов обработки результатов измерений (ГОСТ Р 54082) в разных стандартах создает трудности в понимании и использовании изложенных в них материалов. А внесение принципиальных дополнений в окончательные редакции стандартов, представляемых для их утверждения в Росстандарте (новые методы определения скорости изменения температуры в камере, показатели влагозащиты и др.) без их согласования, является нарушением правил стандартизации и плохой практикой ТК 341.

Выводы

1. Необходимо пересмотреть и коренным образом поменять те условия, которые созданы в стране, позволяющие «плодить» такие документы. Необходимо поднять профессионализм разработчиков, обеспечить нормальное прохождение всех документов по этапам жизненного цикла, уделив особое внимание работе корректоров, и, наконец, обеспечить добросовестную экспертизу документов со стороны Росстандарта при разработке и утверждении таких ГОСТов.

2. Не торопиться использовать положения вышеуказанных стандартов по методам аттестации климатических камер и руководствоваться положением ГОСТ Р 8.568-97 «Методика первичной (следовательно и периодической) аттестации ИО не имеет ограничения по сроку действия, и если она удовлетворяет требованиям, предъявляемым к аттестуемому ИО по точности и воспроизводимости результатов, она может применяться ИП в дальнейшем для аттестации однотипного ИО аналогичного назначения независимо от сроков его введения в эксплуатацию».

3. Необходимо создать рабочую группу для уточнения плана стандартизации в области методов аттестации ИО, наметив пересмотр уже утвержденных ГОСТов и разработку новых. Очевидно, что указанная рабочая группа не должна создаваться на базе ТК 341.

УДК 681.32

Бурлаченко, А. В.

К проблеме аттестации испытательного оборудования на современном этапе / А. В. Бурлаченко, В. Н. Писарев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 88–92.

Бурлаченко Александр Владимирович

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Институт испытаний и сертификации вооружений
и военной техники

111024, г. Москва, Энтузиастов проезд, 11.

(495) 637-37-11

E-mail: inis@inis.ru

Писарев Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, заместитель
генерального директора, Институт испытаний
и сертификации вооружений и военной техники

111024, Москва, Энтузиастов проезд, 11.

(495) 637-37-11

E-mail: pisarev@inis.ru

A. Burlachenko

candidate of technical sciences, docent, the scientific
worker of the institute of tests and certification
of armaments and military equipment

111024, Moscow, Enthusiasts the passage, 11.

(495) 637-37-11

E-mail: inis@inis.ru

V. Pisarev

doctor of technical science, professor, the deputy
of general director the institute of tests
and certification of armaments and military equipment

111024, Moscow, Enthusiasts the passage, 11.

(495) 637-37-11

E-mail: pisarev@inis.ru

Аннотация. Дается анализ современных нормативных документов, применяемых для добровольной аттестации испытательного оборудования. Указаны несоответствия и нестыковки, неизбежно встречающиеся в практической работе по применению указанных документов. Предлагаются меры по повышению эффективности нормативной базы.

Ключевые слова: испытательное оборудование, методы и средства аттестации, разработка ГОСТ, экспертиза.

Abstract. The analysis of the modern normative documents applied to voluntary certification of the test equipment is given. Discrepancies and the disagreements which are inevitably meeting in practical work on application of specified documents are specified. Measures for increase of efficiency of regulatory base are offered.

Key words: test equipment, methods and means of certification, development of GOST, examination.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ

Т. Ю. Бростилова, С. А. Бростилов, Т. И. Мурашкина

Введение

Современное состояние строительной науки и практики в области градостроительства настоятельно требует разработки эффективных методик непрерывного исследования состояния строительных конструкций и воздействующих нагрузок. Система мониторинга конструкций предполагает установку различных датчиков на элементах конструкций зданий и сооружений с целью определения влияния физического (влажность, температура) и силового (статическая и динамические нагрузки) воздействия на их прочность и деформацию. Первые системы были созданы для наблюдения за конструкциями при землетрясении. Это традиционное их применение способствовало более глубокому пониманию природы землетрясений, их влияния на конструкции, что в итоге привело к разработке более надежных проектов сооружений в зонах с высокой сейсмической активностью. Первые системы мониторинга устанавливались на крупномасштабные конструкции, такие как госпитали, дамбы и протяженные мосты.

В настоящее время актуален мониторинг конструкций многофункциональных высотных зданий с целью предупреждения их обрушения под влиянием природно-техногенных воздействий, особенно таких, как ветровые нагрузки, промышленная динамика, изменения грунтовых условий под объектом. Высотные здания относятся к категории объектов города, аварийное состояние которых может вызвать непредсказуемые катастрофические последствия. Поэтому на каждом таком здании должна быть реализована комплексная система безопасности.

На основе изучения основ проектирования волоконно-оптических измерительных приборов и проведенного анализа технических решений волоконно-оптического датчика деформации для мониторинга железобетонных конструкций было решено разработать волоконно-оптический датчик деформации отражательного типа, отличающийся малыми габаритами, простотой конструкции и изготовления наряду с высокой точностью измерения, помехоустойчивостью, искро-, взрыво-, пожаробезопасностью.

Описание конструкции

Предлагаемый датчик содержит подводящие (ПОВ) и отводящие оптические волокна (ООВ), корпус 3 и крышку 4. Упругий элемент 6 жестко крепится на поверхности наблюдаемой конструкции. Во избежание поломки ООВ в месте максимального изгиба они помещены во фторопластовые трубки 2, клеенные во втулку 5 (рис. 1).

Фотоблок представляет собой держатель 9, в который клеены светодиод 7, рабочий и компенсационный фотодиоды 8. Фотоблок присоединяется к блоку преобразования информации (БПИ) с помощью розетки типа МР1-10-5-В. К контактам розетки подпаиваются выводы светодиода и фотодиодов.

Расстояние от ПОВ и ООВ до зеркальной поверхности упругого элемента выбрано из условия наиболее эффективного ввода оптического излучения: $X_0 = 6,5$ мм. Также для выполнения условия эффективного ввода излучения в ООВ были выбраны следующие оптические и конструктивные параметры:

- геометрические параметры упругого элемента: ширина $b = 4$ мм; длина $l = 21$ мм; толщина $h = 0,25$ мм;
- диаметр сердцевины оптических волокон $d_c = 0,2$ мм;
- материал волокон: кварц с показателем преломления $n = 1,47$.

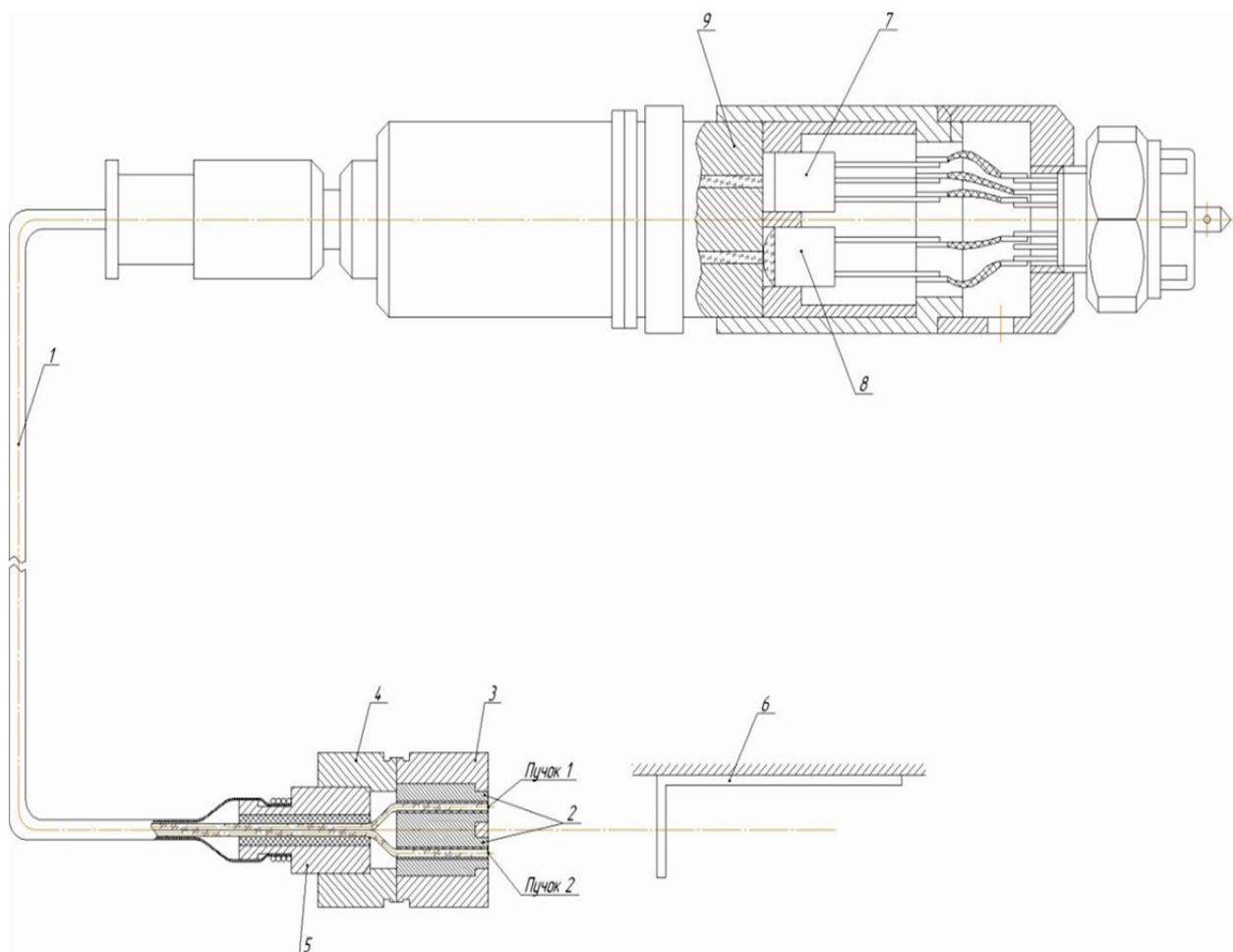


Рис. 1. Общий вид ВОДФ

Крепление упругого элемента производится жестко на поверхности наблюдаемого объекта. В качестве упругого элемента используется плоская пружина, имеющая загиб с одного края на угол, равный 90° , и обладающая более высокой чувствительностью к нагрузкам по сравнению с упругими подвесами других типов.

Так как ВОДФ работает при переменных напряжениях, в широком температурном диапазоне с циклическим изменением температуры окружающей среды, то отражатель выполнен из стали 36НХТЮ, наиболее полно удовлетворяющей данным условиям.

Принцип действия

В процессе проектирования разработана структурная схема ВОДФ, которая приведена на рис. 2. ВОДФ включает в себя: упругий элемент, закрепленный на объекте мониторинга, выполненный в виде металлической пластины определенной формы; волоконно-оптический преобразователь деформации (ВОПФ); блок преобразования информации.

Деформация железобетонной конструкции вызывает прогиб металлической пластины, один конец которой загнут под прямым углом, а его наружная поверхность отполирована, и соответственно, изменение положения загнутой части пластины, т.е. изменение угла наклона отражающей поверхности преобразуется в изменение интенсивности светового потока в зоне измерений.

Измерение параметров деформации основано на регистрации изменения интенсивности светового потока, отраженного от полированной поверхности металлической пластины, закрепленной на объекте измерения. Таким образом, для модуляции интенсивности оптического сигнала используется зависимость величины угла отражения падающего на отражатель луча от расстояния, на которое прогнется металлическая пластина при ее деформации.

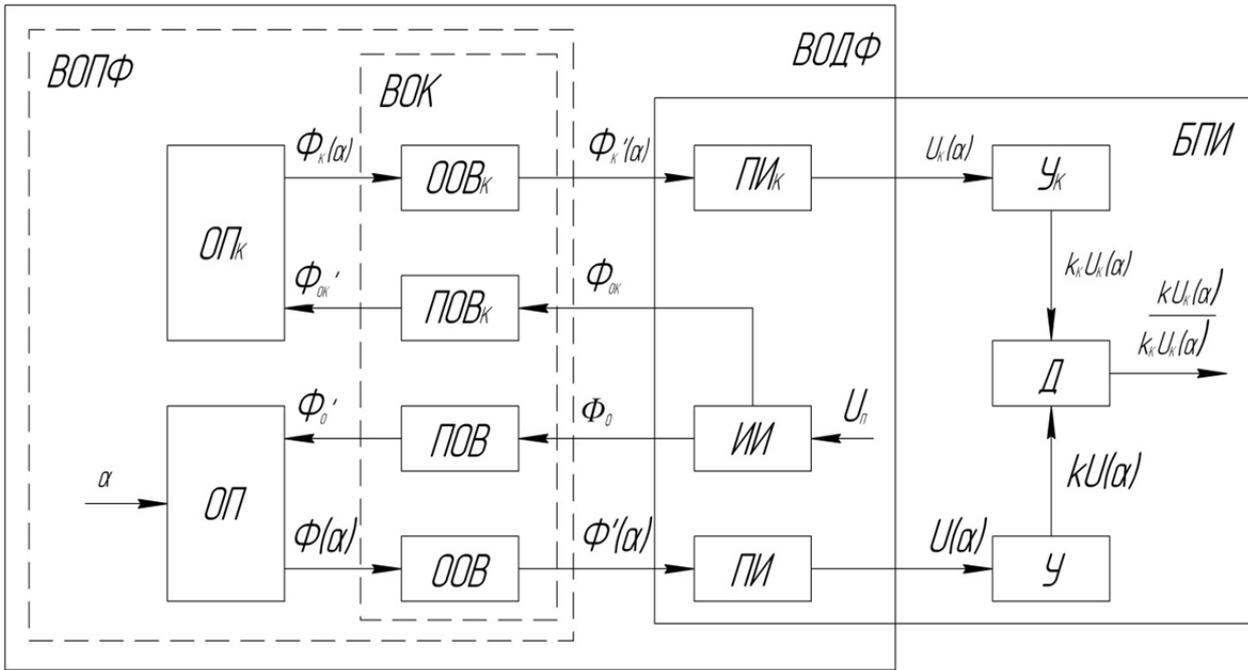


Рис. 2. Структурная схема ВОДФ:

ИИ – источник излучения; ПОВ, ПОВ_к – подводящее оптическое волокно измерительного и компенсационного канала; ОП, ОП_к – отражающие поверхности; ООВ, ООВ_к – отводящие оптические волокна; ПИ, ПИ_к – приемники излучения; У, У_к – усилители сигнала; Д – делитель напряжения; БПИ – блок преобразования информации; ВОК – волоконно-оптический кабель; ВОПФ – волоконно-оптический преобразователь деформации; ВОДФ – волоконно-оптический датчик деформации

ВОДФ работает следующим образом. Световой поток Φ_0 от источника излучения ИИ по подводящему оптическому волокну измерительного канала ПОВ подается в зону измерения. Под действием деформации происходит отклонение отражающей поверхности от оси Z. Изменение положения отражающей поверхности вызывает изменение интенсивности светового потока. Световой поток $\Phi(\alpha)$ поступает от отражающей поверхности (ОП), которая меняет угол наклона под действием деформации, по отводящему оптическому волокну измерительного канала на приемник излучения измерительного канала.

Приемник излучения преобразует оптический сигнал $\Phi'(\alpha)$ в электрический $U(\alpha)$. Данный сигнал поступает на вход блока преобразования информации, где происходит его усиление.

В разработанной структурной схеме дополнительно к измерительному предусмотрен компенсационный канал. Это позволит компенсировать изменение мощности излучения светодиода, чувствительности фотодиода при изменении температуры окружающей среды и неинформативные потери светового потока при изгибах волоконно-оптического кабеля.

Световой поток $\Phi_{ок}$ от источника излучения по подводящему оптическому волокну компенсационного канала поступает на жестко закрепленную отражательную поверхность, положение которой относительно ПОВ_к и ООВ_к остается неизменным в процессе измерения. Отраженный световой поток $\Phi_k(\alpha)$ по отводящему оптическому волокну компенсационного канала поступает на приемник излучения ПИ_к, где происходит преобразование оптического сигнала $\Phi_k'(\alpha)$ в электрический $U_k(\alpha)$. Данный сигнал поступает на вход БПИ.

Усиленные электрические сигналы $U(\alpha)$ и $U_k(\alpha)$ с выходов измерительного и компенсационного каналов соответственно подвергаются операции деления. На выходе наблюдается сигнал, пропорциональный отношению потоков излучения. По полученному отношению можно судить о наличии деформации конструкции и ее величине.

Расчет оптической системы

Основная задача, которая стоит на стадии проектирования, заключается в определении расстояний X_0 , апертурного угла Θ_{NA} , и ряда других параметров, обеспечивающих эффективный ввод

излучения из ПОВ в ООВ, линейную функцию преобразования $W = f(Z)$, максимальную глубину модуляции оптического сигнала и равномерное распределение освещенности в плоскости расположения торца ООВ.

На рис. 3 представлены графические пояснения к определению расстояния X_0 .

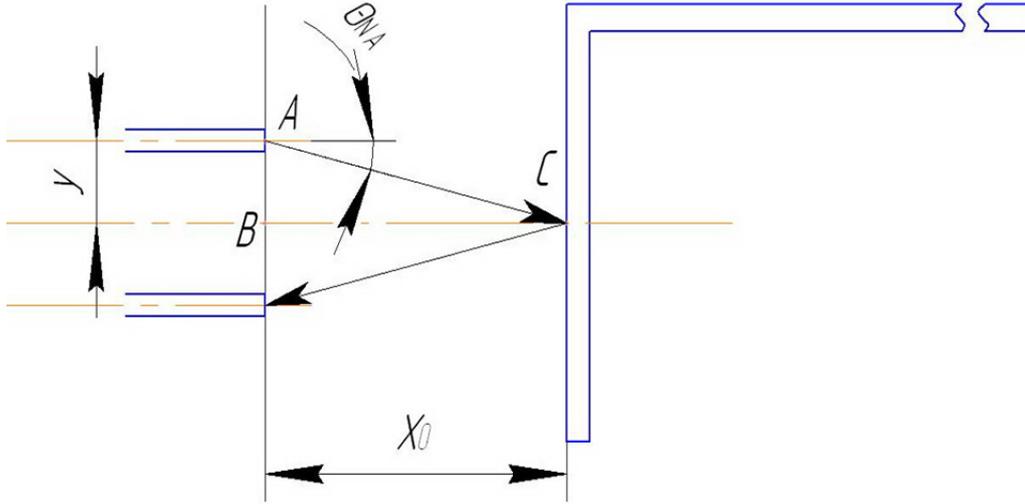


Рис. 3. Расчетная схема измерительного преобразователя ВОДФ

Наиболее оптимальное расположение торцов ПОВ и ООВ от зеркальной поверхности упругого элемента находится на расстоянии X_0 . Такое техническое решение более предпочтительно, так как дает максимальный ввод оптического излучения в ООВ.

Величина y зависит от диаметра наконечника, в данном случае используется наконечник диаметром $d = 3$ мм, следовательно, $y = 1,5$ мм. Тогда расстояние X_0 определится из треугольника ΔABC :

$$y = x_0 \operatorname{tg} \Theta_{NA}; \tag{1}$$

$$x_0 = \frac{y}{\operatorname{tg} \Theta_{NA}} = \frac{1,5}{0,23} = 6,5 \text{ (мм)}, \tag{2}$$

где угол $\Theta_{NA} = 12,7^\circ$.

При расчете параметров оптической части датчика использовались следующие данные: диаметр сердцевины оптического волокна $d_c = 200$ мкм, диаметр оптического волокна $d_{ОВ} = 500$ мкм, оптическое волокно типа ОВ-ИК-1,2-400 ТУАБ.60.98.

Расчет упругого элемента (рис. 4)

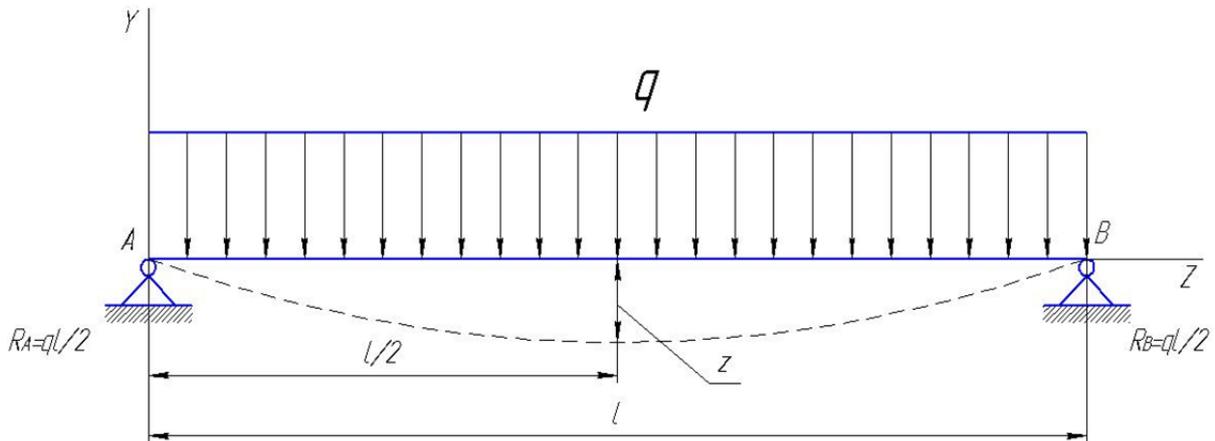


Рис. 4. Схема к определению длины упругого элемента

В силу симметрии реакции равны [1]

$$R_A = R_B = \frac{ql}{2}. \quad (3)$$

Помещаем начало координат на левой опоре. Тогда $v_0 = 0$,

$$EIv_{z=l} = EI\vartheta_0 l + \frac{ql(l-0)^3}{2 \cdot 6} - \frac{q(l-0)^4}{24} = 0, \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала пружины, $E = 2,1 \cdot 10^5$ Па; I – момент инерции поперечного сечения относительно ее оси, проходящий через центр тяжести перпендикулярно направлению изгиба:

$$I = \frac{1}{6}bh^2, \quad (5)$$

где b и h – ширина и толщина упругого элемента соответственно.

Откуда

$$\vartheta_0 = -\frac{ql^3}{EI} = \vartheta_A. \quad (6)$$

Очевидно, $\vartheta_A = \vartheta_B$.

Максимальный прогиб находится на середине балки

$$EIv_{z=\frac{l}{2}} = \frac{ql^3}{24} \frac{l}{2} + \frac{ql\left(\frac{l}{2}-0\right)^3}{2 \cdot 6} - \frac{q\left(\frac{l}{2}-0\right)^4}{24} = -\frac{5ql^4}{384}. \quad (7)$$

Следовательно,

$$z = -\frac{5ql^4}{384(EI)}. \quad (8)$$

Знак минус показывает, что направление прогиба вниз, тогда

$$l = \sqrt[4]{\frac{384zEI}{5q}}. \quad (9)$$

В соответствии с условиями работы пружины выбираем ее материал [1]. При этом необходимо руководствоваться основными эксплуатационными требованиями:

1) упругие характеристики должны соответствовать диапазону измеряемой деформации и требуемой чувствительности к входному воздействию на всем интервале температур;

2) материал не должен претерпевать фазовые превращения в интервале температур эксплуатации;

3) упругий материал должен быть химически стоек в рабочей среде, не взаимодействовать с другими используемыми материалами;

4) модуль упругости материала должен в минимальной степени зависеть от изменения температуры, т.е. температурный коэффициент модуля упругости (ТКМУ) должен быть минимальным;

5) температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала упругого подвеса должен быть минимальным.

Наибольшей универсальностью свойств отличаются упругие сплавы аустенитного класса, содержащие значительное количество никеля и хрома, к их числу относится сплав 36НХТЮ. Этот сплав обладает рядом важных физико-механических и технологических свойств: стабильностью характеристик в широком температурном диапазоне, достаточной жесткостью и пластичностью,

износостойкостью, коррозионно-стойкостью, большим числом знакопеременных циклов нагружений, стойкостью к циклическим изменениям температуры окружающей среды, неизменностью модуля упругости после воздействия деформаций, высокой отработанностью технологии термообработки, сравнительно невысокой стоимостью материала.

По результатам расчетов были получены следующие параметры упругого подвеса:

- размеры незащемленной части упругого элемента (отражателя): ширина $b = 10$ мм; длина $l = 14$ мм; толщина $h = 1$ мм;
- размеры жестко закрепленной части упругого элемента: ширина $b = 10$ мм; длина $l = 300$ мм; толщина $h = 1$ мм.

Заключение

1. На основе результатов теоретических исследований авторами была разработана конструкция волоконно-оптического датчика деформации.
2. Была разработана структурная схема ВОДФ, особенностью которой является компенсационный канал, который позволит компенсировать изменение мощности излучения светодиода, чувствительности фотодиода при изменении температуры окружающей среды и неинформативные потери светового потока при изгибах волоконно-оптического кабеля.
3. Опираясь на априорную информацию, был выполнен расчет параметров оптической и механической части ВОДФ.

Список литературы

1. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980.

УДК 681.586.5

Бростилова, Т. Ю.

Волоконно-оптический датчик деформации / Т. Ю. Бростилова, С. А. Бростилов, Т. И. Мурашкина // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 93–99.

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра «Автоматизированные
электроэнергетические системы»,
Пензенский государственный университет
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(8412) 36-82-72
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru.

Бростилов Сергей Александрович

аспирант, кафедра «Конструирование
и производства радиоаппаратуры»,
Пензенский государственный университет
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(8412) 36-82-12
E-mail: ser-brostilov@yandex.ru

Мурашкина Татьяна Ивановна

доктор технических наук, профессор,
кафедра «Приборостроение»,
Пензенский государственный университет
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(8412) 36-80-89
E-mail: timurashkina.pgu@mail.ru

T. Brostilova

Candidate of Technical Sciences,
docent of of chair AEES,
Penza State University
440026, Penza, Krasnaya street, 40.
(8412) 36-82-72
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru.

S. Brostilov

the post-graduate student of chair Design
and manufacture of radio equipment,
Penza state university.
440026 Penza, Krasnaya street, 40.
(8412) 36-82-12
E-mail: ser-brostilov@yandex.ru

T. Murashkina

doctor of technical science, professor,
chair Instrument, Penza state university.
440026, Penza, Krasnaya street, 40.
Tel. (8412) 36-80-89
E-mail: timurashkina.pgu@mail.ru

Аннотация. Разработана конструкция волоконно-оптического датчика деформации (ВОДФ), отличающегося малыми габаритами, простотой конструкции и изготовления наряду с высокой точностью измерения, помехоустойчивостью, искро-, взрыво-, пожаробезопасностью. Проведен расчет конструктивных параметров оптической системы волоконно-оптического преобразователя и упругого элемента.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик деформации, оптическая система, блок преобразования информации, приемники излучения.

Abstract. The design of the fiber-optical sensor of the deformation, differing by small dimensions, simplicity of a design and manufacturing, along with high precision of measurement, a noise stability, iskra-, vzryvo-, a požarobezопасnost is developed. The calculation of the design parameters of the optical system of fiber optic transmitter and elastic element.

Key words: fiber-optical sensor of deformation, optical system, block of transformation of information, radiation receivers.

Вниманию авторов!

Редакция научно-практического журнала «Надежность и качество сложных систем» приглашает ученых и специалистов опубликовать оригинальные статьи, содержащие новые научные и практические результаты в области фундаментальных и прикладных исследований проблем обеспечения надежности и качества сложных как технических, так и эргономических систем по следующей тематике:

- фундаментальные основы обеспечения безопасности, надежности и качества;
- физико-математические методы и модели обеспечения надежности и качества сложных систем;
- информационная безопасность сложных систем;
- технологические основы повышения надежности и качества изделий;
- информационные технологии в проектировании, производстве, испытаниях и сертификации высоконадежных систем;
- надежность биологических и экологических систем и приборов;
- диагностические методы обеспечения надежности и качества сложных систем;
- моделирование и управление в эргономических системах.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (kipra@pnzgu.ru, дискета 3,5", CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи – 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt, через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья **обязательно** должна сопровождаться индексом УДК, краткой аннотацией и ключевыми словами **на русском и английском языках**.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версии 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

Редколлегия