

УДК 62-52

В.И. Швецова, аспирант

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

АНАЛИЗ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

Приводится краткий анализ изученности эргатических систем контроля вредных веществ повышенной опасности, предлагается методологический подход к учету надежности человека-оператора в них на основе марковских моделей.

Ключевые слова: *надежность, эргатическая система контроля, человек-оператор, методологический подход, марковская модель.*

Актуальность исследования. Согласно [1] к объекту повышенной опасности относят объект, на котором используются, изготавливаются, перерабатываются, хранятся или транспортируются одно или несколько опасных веществ или категорий веществ в количестве, равном или превышающем нормативно установленные пороговые массы, а также другие объекты как таковые, что согласно закону является реальной угрозой возникновения чрезвычайной ситуации техногенного и природного характера.

Объекты повышенной опасности, содержащие химические опасные и взрывоопасные вещества, нашли широкое распространение в различных областях хозяйственной деятельности, в военно-промышленном комплексе и в воинских частях. Им придано особое, государственное значение, закреплённое законом Украины «Об объектах повышенной опасности» и государственными нормативно-руководящими актами. Для объектов повышенной опасности контроль вредных веществ должен быть непрерывный, автоматизированный, доступный и недорогой. Такой контроль может быть обеспечен с помощью эргатических систем, которые являются трехзвенными: техника–человек–среда, и в которых действие человека играет, в ряде случаев, решающую роль. Поэтому исследование надежности, как основного свойства (критерия) эргатической системы, которое включает в себя надежность технической части и надежность человека-оператора, является актуальной проблемой.

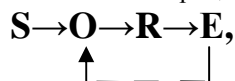
Анализ проблемы, постановка исследования. Система в общем понимании – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которые образуют определенную целостность и единство [2]. Каждая система имеет структуру. Структура – это сеть связей и отношений ее элементов. При одних и тех же элементах, но разных связях и отношениях их между собой система может быть более или менее эффективной. Это обуславливает необходимость оптимизации структур системы (подсистем, элементов), которая может быть выполнена на стадии проектирования. Известны системы технические и социальные. Однако, наибольшее распространение во всех сферах человеческой деятельности получил третий тип – социально-технические, имеющие общее название – эргатические системы. Эти системы пока что не имеют единой классификации из-за большого их разнообразия, т.е. множества оценочных критериев. Сочетание способностей человека и возможностей техники, существенно повышает эффективность функционирования защиты объектов повышенной опасности в целом. Эта эффективность определяется тем, в какой мере при создании системы были учтены присущие человеку и технике особенности, в том числе ограничения, в первую очередь, нормативные в условиях повышенной опасности, и их потенциальные возможности. Поэтому комплексное исследование эргатических систем контроля и защиты объектов повышенной опасности предлагает их изучение как единого целого, что позволяет достичь новых качественных результатов [3].

До сих пор оценка надежности и эффективности эргатических систем и человека-оператора в них выполняется по-разному и без убедительных обоснований, что тормозит, в некоторой мере, дальнейшее совершенствование безопасности эксплуатации объектов повышенной опасности. Возникает необходимость в разработке единого подхода и методологии и оценке надежности человека-оператора для проектировщиков эргатических систем.

Целью данной статьи является анализ методологического подхода к учету надежности человека-оператора в эргатических системах контроля вредных веществ повышенной опасности.

Для понимания поведения оператора необходимо исследовать три параметра: входной сигнал, внутренняя реакция и отклик на выходе. Входной сигнал *S* представляет собой любое изменение в окружающих условиях, воспринимаемое оператором (зажигание индикаторной лампочки, звуковой сигнал и пр.). Внутренняя реакция *O* оператора (т.к. эта реакция происходит в нем) представляет собой восприятие и обработку физического сигнала *S* (запоминание, процесс решения и интерпретация фактора). Отклик на выходе *R* представляет собой действие, обусловленное внутренней реакцией оператора *O* на входной сигнал *S* (нажатие кнопки, например).

Поведение человека характеризуется комбинацией этих трех составляющих: $S \rightarrow O \rightarrow R$. Сложное поведение определяется наличием сложных цепей $S_i \rightarrow O_i \rightarrow R_i$, представленных между собой и продолжающих действовать совместно. Когда оператор опознает сигналы, связанные с успешными или неудачными исходами, то у него достаточно сведений для принятия решения о продолжении или прекращении отклика R на сигнал S . Схематически этот процесс имеет следующий вид:



где E – окружающие условия; пунктирная линия – сигнал обратной связи.

Основополагающим аспектом в проектировании, изготовлении и эксплуатации эргатических систем является оценка и прогнозирование надежности работы человека. Наряду с развитием теории человеческой надежности, первые масштабные экспериментальные исследования по оценке надежности работы человека были проведены американским исследовательским институтом по заказу Министерства обороны США, связанных с вопросами контроля и исполнения индикаторов с целью получения частот ошибок человека, которые приведены в [3, т. 3, гл. 3, с. 122-143]. Эти данные являются уникальными и единственными, которыми может воспользоваться конструктор при выборе органов управления и индикаторов с целью обеспечения наибольшей вероятности безотказной работы техники.

Эргатические системы контроля и защиты объектов повышенной опасности, в первую очередь, должны быть эффективными и надежными. Эти свойства системы в целом определяются составляющими эффективности и надежности действий технической части и человека-оператора. Чаше всего при разработке и проектировании системы этого вида ее эффективность и надежность оценивается только по технической части. При этом эффективность эргатической системы оценивается по экономической составляющей. Это связано с тем, что в настоящее время отсутствуют не только рабочие методики, но и методология оценки эффективности с учетом интегрального критерия и надежности, с учетом составляющей технической части, и человека-оператора.

Эргатическая система рассматривается как техническая динамическая система со структурой техника – человек – среда, с открытыми границами, состояние детерминированное в дискретные моменты времени, но она может переходить в стохастическое состояние вследствие отказов и восстановления работоспособности ее элементов. Принимается с некоторым допущением, что элемент человек-оператор воспринимает сигналы и реакции как другие технические элементы. Система рассматривается как единое целое, что позволяет принимать для описания надежности ее один и тот же математический аппарат.

Однако, поскольку свойство и чувства человека-оператора намного разнообразнее, и любая машина не может их воспроизвести, то исследователи ищут пути их заалгоритмизации и математического моделирования в согласии с техникой. Одним из показателей надежности операторов используют вероятность безотказной работы. Но, разнообразие эргатических систем по структуре, назначению, объему и характеру действий человека-оператора в них затрудняют разработку математического моделирования человеческой надежности, доступной для проектировщиков и практического применения вообще.

Элемент человек-оператор в эргатической системе контроля вредных веществ по его функциональным действиям более совместимый с техническими элементами, чем, например, действия диспетчера аэропорта. Поэтому математическое описание надежности человека-оператора для первого случая более адекватно на основе теории синтеза сложных технических систем с применением морфологического анализа, теории графов и марковских случайных процессов состояний работоспособности и отказов (ошибок) оператора [4-5].

Поток отказов работоспособности системы и ее восстановление с отмеченными свойствами является простейшим стационарным, и он описывается выражением закона Пуассона:

$$P(K) = \frac{\lambda \cdot \tau}{K!} e^{-\lambda \tau}$$

при дискретном распределении времени безотказной работы и времени восстановления, подчиняющегося экспоненциальному закону

$$P(\tau) = e^{-\lambda \tau},$$

как частному случаю пуассоновского закона при непрерывном распределении времени.

Поток отказов и восстановлений формирует состояния S системы и ее элементов. При этом система из одного состояния переходит в другое состояние. В качестве структурных схем расчета показателей надежности при разработке и проектировании систем применяются графы (диаграммы) состояний и переходов из одного состояния в другое. Для математического описания графа переходов состояний при экспоненциальном распределении наработок до отказа элементов широко применяются марковские методы. Если принимаем, что в эргатической системе контроля вредных веществ элемент

человек-оператор воспринимает сигналы и реакции как другие технические элементы, то можно допустить возможность применения для оценки человеческой надежности, в виде вероятности безотказности действий, марковские переходные процессы.

Для эргатических систем под их надежностью понимается свойство системы выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования с учетом человеческого фактора при достижении конечного нормированного результата с необходимыми для этого финансовыми затратами [6]. Данное определение ориентирует на оценку общей надежности эргатической системы по ее составляющим: технической части и эргономической части. Техническая составляющая – надежность технической части эргатической системы контроля и защиты объекта повышенной опасности. Показатели надежности технической части эргатической динамической системы при простейших стационарных потоках отказов описывается пуассоновским и экспоненциальным законами распределения.

Эргономическая – это надежность действий человека оператора в системе. Поскольку человек в эргатической системе представляет ее элемент, воспринимающий реакции и выдающий сигналы, как другие технические элементы динамической системы, то за показатель надежности можно принять вероятность безотказных действий его в системе $P_{\text{ч.о}}$. При этом следует принять допущение, что поток его отказов (ошибок) также является простейшим, ординарным и стационарным. При этом, принимая отказы элементов случайными и независимыми между собой, общая вероятность (надежность) безотказности эргатической системы $P = P_{\text{т}} \cdot P_{\text{ч.о}}$.

Так как каждый элемент (орган) управления и индикатор эргатической системы имеет известное число размерных параметров, и каждый параметр связан с оценкой надежности работы человека, то необходимо использовать отдельные параметрические показатели надежности для получения общей оценки уровня надежности работы оператора с данным органом (элементом) управления или индикатором. Это осуществляется путем перемножения отдельных параметрических показателей надежности. Эти показатели определяются опытным путем. К сожалению, в настоящее время нет широкой статистики показателей надежности человека. Практически совсем отсутствует статистика надежности человека в механических системах. Более полная статистика имеется по органам управления и индикаторам, приведенная в справочнике [3]. По этим данным проектировщик (конструктор) может определить обеспечит ли данная комбинация размерных параметров органам управления достаточную надежность или же более удовлетворительной окажется какая-либо другая структурная совокупность параметров системы.

Оценка надежности работы человека может быть выполнена через вероятность появления ошибок оператора в последующих событиях (прогнозах) или испытаниях. В этом случае вероятностная оценка качества работы оператора определяется отношением r/n , где r – число успешно выполненных испытаний, n – общее число испытаний. Это отношение можно получить опытным путем.

Отношение r/n представляет собой лишь статистическую оценку и не может рассматриваться как истинная вероятность $P_{\text{т}}$. Чтобы получить доверительный интервал для $P_{\text{т}}$ по отношению r/n и заданной достоверности α можно воспользоваться выражением [3], где

$$\sum_{i=r}^n p^i \cdot q^{n-i} = 1 - \alpha,$$

где α – достоверность того, что истинная вероятность $P_{\text{т}}$ лежит в интервале от p до 1; p – нижняя граница $P_{\text{т}}$; $q = 1 - p$ – уровень значимости. Более подробные используемые статистические методы изложены в [3, 7].

В [3] представлена также математическая модель для количественного определения ошибок, весьма близкая модели, используемой при анализе надежности. Эта модель описывается математическим выражением вида

$$Q_i = 1 - (1 - F_i \cdot P_i)^{n_i},$$

где P_i – вероятность того, что операция будет выполнена таким образом, что будет совершена ошибка i ; F_i – вероятность того, что при совершении ошибки i произойдет отказ; n_i – число аналогичных операций, при которых может быть совершена ошибка i ; Q_i – вероятность появления отказов в результате совершения ошибки i .

Если появление отказа обуславливается сочетанием двух ошибок, то $P_i = P_1 \cdot P_2$, где P_1 и P_2 – соответствующие вероятности совершения этих ошибок.

Общая вероятность появления отказа осуществляется выражением $Q_T = 1 - \prod_{K=1}^n (1 - Q_R)$, где Q_R – вероятность одного из класса n ошибок.

Из приведенного выше следует, что методы оценок при прогнозировании структурной надежности работы человека в эргатических системах основываются на опытных данных, статистика которых крайне ограничена, а поэтому проектировщики не имеет разрешающих решений. Кроме того, совершенствование структуры эргатической системы контроля и защиты объекта повышенной опасности путем оптимизации ее, требует обоснованного интегрального критерия в виде целевой функции, отражающей основные свойства, в число которых входит надежность технической части и оператора, являющегося частным случаем общей эффективности системы. Такой критерий и методология оптимизации эргатических систем предложена в работах [8, 9]. В общем случае выражение этого критерия имеет вид

$$\text{opt} \left\{ J = P_T \cdot P_{\text{ЧО}} \cdot \frac{\Delta Y}{K_3 + \text{Эз} \cdot T} \right\} \rightarrow \max ,$$

где P_T – вероятность безотказной работы технической части системы; $P_{\text{ЧО}}$ – вероятность безотказных действий человека-оператора в системе; ΔY – предотвращенный ущерб при оборудовании объекта исправно действующей системой; K_3 – капитальные затраты на проектирование, изготовление и монтаж системы на объекте; Эз – годовые приведенные эксплуатационные затраты на обслуживание системы; T – нормативный срок службы системы.

Как видно из выражения (7) надежность действий человека-оператора в системе также оптимизируется, как и ее техническая часть. Поскольку эргатическая система является динамической, т.е. ее элементы и она в целом находится в различных случайных во времени состояниях, то необходимо учитывать при оценке надежности вероятности этих состояний. Вероятности состояний технической части системы могут быть описаны математическим аппаратом марковских процессов.

Продемонстрируем такой подход на упрощенной модели автоматической системы экологического мониторинга, состоящую из трех элементов (модулей, подсистем): поста контроля параметров окружающей среды (ПК), канала связи (КС), центральной ЭВМ. Схема системы АСКС приведена на рисунке 1.

Система контроля восстанавливаемая и нерезервируемая. Отказ одного из элементов приводит к отказу всей системы. Изобразим функционирование данной системы с помощью теории графов (рисунок 2) состояний: S_0 – состояние безотказной работы системы с финальной вероятностью P_0 ; S_1 – состояние поста контроля после отказа с финальной вероятностью P_1 ; S_2 – состояние канала связи после отказа с финальной вероятностью P_2 ; S_3 – состояние центральной ЭВМ после отказа с финальной вероятностью P_3 ; λ_i – интенсивность отказов работоспособности элементов системы; μ_i – интенсивность восстановления работоспособности элементов системы.

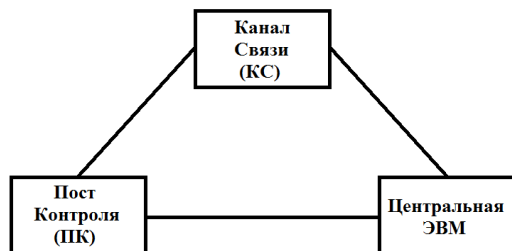


Рисунок 1 – Структура АСКОС

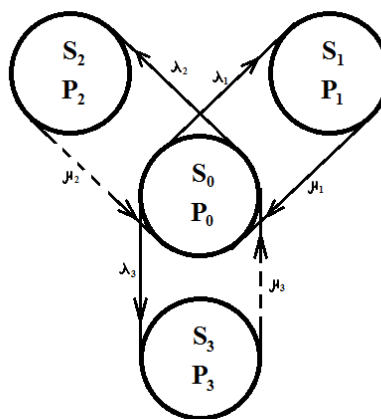


Рисунок 2 – Граф состояний и вероятностей системы АСКВОС

Вероятность нахождения системы в данном состоянии представляется марковской моделью по схеме: $S_0 \rightarrow P_0$; $S_1 \rightarrow P_1$; $S_2 \rightarrow P_2$; $S_3 \rightarrow P_3$. Вероятность изменения состояния S_0 за малый промежуток времени ($d\tau \rightarrow 0$) описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda_1 P_0 + \mu_1 P_1 - \lambda_2 P_0 + \mu_2 P_2 - \lambda_3 P_0 + \mu_3 P_3,$$

где $\lambda_i P_i$ – выражение состояния элемента системы после отказа; $\mu_i P_i$ – выражение состояния элемента системы после восстановления работоспособности.

Вероятности P_i состояния элементов S_i описываются системой аналогичных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} S_1 \left\{ \frac{dP_1}{dt} = -\mu_1 \cdot P_1 + \lambda_1 \cdot P_0 \right\} \\ S_2 \left\{ \frac{dP_2}{dt} = -\mu_2 \cdot P_2 + \lambda_2 \cdot P_0 \right\} \\ S_3 \left\{ \frac{dP_3}{dt} = -\mu_3 \cdot P_3 + \lambda_3 \cdot P_0 \right\} \\ S_4 \left\{ \frac{dP_4}{dt} = -\mu_4 \cdot P_4 + \lambda_4 \cdot P_0 \right\} \end{array} \right\}.$$

Для решения этой системы дифференциальных уравнений необходимо иметь значения интенсивностей отказов λ_i и восстановлений μ_i , которые определяются опытным путем для конкретных реальных эргатических систем и условий их применения. Отсутствие таких данных затрудняет решение этих уравнений, что требует дальнейших исследований.

Выводы

1. Выявлено, что при разработке и проектировании эргатических систем структурная надежность их учитывается формально по аналогам подобных систем или источникам другого назначения, а эргатическая составляющая надежности оператора не учитывается или формально принимается из каких-то источников. Это, очевидно, связано с недостаточной изученностью данного вопроса, а следовательно, с отсутствием доступных методов ее оценки.

2. Обоснованно, что в эргатической системе контроля вредных веществ элемент человек-оператор воспринимает сигналы и реакции как другие технические элементы, тогда можно допустить возможность применения для оценки человеческой надежности, в виде вероятности безотказности действий, марковские модели.

Перспектива дальнейших исследований. Предлагается исследовать возможность применения математического аппарата Маркова и Колмогорова для описания надежности человека-оператора в эргатических системах контроля вредных веществ, принимая процессы и состояния переходов элементов динамической системы, используя синтез теории сложных технических систем с применением морфологического анализа.

Библиографический список использованной литературы

1. Украина. Законы. Об объектах повышенной опасности: закон Украины // Ведомости Верховной Рады Украины. — 2001. — № 2245-III. — Ст. 1.
2. Фейджин Р.Е. Определение понятия системы / Р.Е. Фейджин, А.Д. Холл // Исследования по общей теории систем. Сборник переводов с польского и английского. — М.: Прогресс, 1969. — С. 252–286.
3. Справочник по надежности. В 3-х томах / под ред. Б.Р. Левина и Б.Е. Бердичевского, пер. с англ. — М.: Мир, 1969. — 1050 с.
4. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И.А. Ушаков. — М.: Радио и связь, 1988. — 210 с.
5. Кузнецов Ю.Н. Методические указания по применению системно-морфологического поиска новых технических решений / Ю.Н. Кузнецов. — К.: КПИ, 1985. — 60 с.
6. Севриков И.В. Экономическая составляющая целевой функции оптимизации структур эргатических систем. / А.И. Севриков // Вестник СевНТУ. Сер. Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. — Севастополь, 2009. — Вып. 97. — С. 150–153.
7. Lloyd D. K. Reliability: Management, Methods, and Mathematics / D. Lloyd, M. Lipow. — NJ: Prentice Hall, 1962. — 227 p.
8. Оптимизация структур информационно-эргатических систем контроля и защиты взрывопожароопасных объектов по масштабному фактору / А.И. Севриков, А.Н. Одинцов, Л.В. Квасова, А.А. Калибачук // Вісник СХУ ім. В. Даля. — Луганск, 2011. — № 5 (159). — Ч. 2. — С. 190–197.

9. Севриков И.В. Экономическая составляющая критерия эффективности вариантов систем защиты объектов повышенной опасности / И.В. Севриков, Л.В. Квасова // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып. 75. — С. 118–122.

Поступила в редакцию 17.01.2014 г.

Швецова В.І. Аналіз вивчення людської надійності ергатичних систем контролю об'єктів підвищеної небезпеки

Наводиться короткий аналіз вивченості ергатичних систем контролю шкідливих речовин підвищеної небезпеки, пропонується методологічний підхід до обліку надійності людини-оператора в них на основі марковських моделей.

Ключові слова: надійність, ергатична система контролю, людина-оператор, методологічний підхід, марковська модель.

Shvetsova V. I. Study analysis of the human reliability of ergatic control systems of high-risk facilities

A brief analysis of studies ergonomics systems control of hazardous substances increased danger, as proposed methodological approach to accounting for the reliability of a human operator to them based on Markov models.

Keywords: reliability, ergatic control system, the human operator, the methodological approach, the Markov model.