Системы контроля окружающей среды № 1 (51) 2023

EDN: https://elibrary.ru/cnmodx

УДК 62-523.8 DOI: 10.33075/2220-5861-2023-1-143-149

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ

В.И. Швецова

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: lerasevas@mail.ru

Приведен обобщенный анализ надежности человека-оператора в эргатических системах контроля и защиты взрывопожароопасных объектов. Обосновывается возможность представления эргатических характеристик человека-оператора в эргатической системе с использованием морфологического анализа по аналогии с анализом технической системы. Приводится фрагмент общей морфологической матрицы характеристик человека-оператора эргатической системы в табличной и аналитической формах. Предложен методологический подход к учету надежности человека-оператора, основанный на использовании морфологического и структурного анализов, заключающийся в принятии из множества возможных характеристик наиболее значимых действий (функций) человека в эргатической системе.

Ключевые слова: эргатическая система контроля, надежность, характеристики человека-оператора, морфологический анализ.

Поступила в редакцию: 03.02.2023.

Введение. Существует довольно много понятий системы, но наиболее полно это понятие можно охарактеризовать как множество взаимосвязанных элементов для определенной (конкретной) цели. Так же, как и определений системы, так и самих видов систем довольно много. В частности, эргатические системы (ЭС), их еще называют человеко-машинные, являются трехзвенными: техника–человек–среда, в которой функционирует система. Эти структуры находятся во взаимосвязи дополняют друг друга. Такие системы окружают нас повсеместно: автомобиль–водитель, самолет–пилот, АЭС–оператор и т.д. В таких системах роль человека (группы людей) является необходимым условием обеспечения безопасного, иными словами надежного, функционирования объекта. Надежность является критерием оценки эффективности, а также безопасности жизни и здоровья людей при функционировании ЭС.

Эргатические системы различны по своему назначению и поэтому не имеют единой классификации. В данной работе рассмотрена эргатическая система пожаровзрывозащиты.

На стадии проектирования при оценке эффективности применения ЭС необходимо рассчитывать надежность не только технической, но и человеческой подсистемы, так при высокой надежности технической составляющей и при низкой эргономической, общая оценка надежности системы в целом будем стремиться к нулю (по правилу умножения независимых событий). Общий анализ систем контроля и управления показал, что в автоматических и даже в автоматизированных системах нередко исключается роль человека-оператора при оценке их эффективности и надёжности, что, на взгляд автора, неверно, и такой подход приводит к некорректному решению оптимизационных задач. При проектировании надежности человека-оператора решаются две основные задачи: первая – определяют действия (операции) и последовательность их выполнения; вторая – оценивают надежность каждой операции и в целом надежность человека. Решение первой задачи не вызывает затруднений. А решение второй затруднительно в связи с отсутствием доступного математического аппарата и ограниченностью статистических (опыт-

ных) данных для различных типов ЭС и условий их применения. Возникает необходимость в дополнительных экспериментальных исследованиях, в привлечении аналоговых данных или ориентировочных методов оценки человеческой надежности, поэтому совершенствование расчетных методов оценок надежности ЭС, как их технической части, так и человека-оператора, остается весьма актуальной задачей.

Анализ проблемы, постановка исследования. Развитие теории сложных систем вызвало необходимость создания теории инженерной психологии, т.е. науки о том, как следует конструировать аппаратуру, выбирать условия, при которых должен работать оператор, и методы работы операторов при оптимальном учете человеческих возможностей и ограничений [1, т. 3, гл. 3 с. 90]. Поэтому теория надежности сложных систем и теория инженерной психологии развивались совместно. Д. Мейстером в [2] предложена структура и формула надежности человека-оператора. Для понимания поведения оператора необходимо исследовать три параметра: входной сигнал, внутренняя реакция и отклик на выходе. Входной сигнал представляет собой любое изменение в окружающих условиях, воспринимаемое оператором (зажигание индикаторной лампочки, звуковой сигнал и пр.). Внутренняя реакция оператора (т.к. эта реакция происходит в нем) представляет собой восприятие и обработку физического сигнала (запоминание, процесс решения и интерпретация фактора). Отклик на выходе представляет собой действие, обусловленное внутренней реакцией оператора на входной сигнал (нажатие кнопки, например). Поведение человека характеризуется комбинацией этих трех составляющих, сложное поведение определяется наличием сложных цепей, 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 на сигнал.

Инженерная психология сформировалась как наука и продолжает совершенствоваться совместно с теорией человеческой надежности в сложных социально-технических системах. Наиболее широко она отображена в энциклопедическом справочнике «Человеческий фактор» [1]. Широко рассмотрены и упорядочены психофизиологические и другие характеристики человека в приложении к действиям оператора: основы теории инженерной психологи; психофизиологические факторы при конструировании; характеристики органов управления и индикаторов; распределение функций между человеком и машиной; напряженность в работе оператора; роль обучения в качестве изделий и др.

Основополагающим аспектом в проектировании, изготовлении и эксплуатации ЭС является оценка и прогнозирование надежности работы человека.

Технический процесс побуждал совершенствование и создание наиболее эффективной и надежной техники с этими базовыми свойствами. Основным направлением развития такой техники являлась ее автоматизация. Автоматизация кроме повышения производительности труда решает не менее важную проблему – обеспечение безопасности людей, т.к. она позволяет вывести их из наиболее опасных зон, таких как химически-, взрыво-, радиационно опасных и др. Автоматизация техники, технологических процессов и производств в целом не возможна без систем контроля и управления. Эти системы по современной классификации являются автоматическими и автоматизированными (эргатическими). Последние включают в себя две подсистемы: техническую и человека-оператора. Не обоснованно считается, что в автоматических системах роль (действия) человека. Это не так, например, в автоматической системе контроля и защиты взрывопожароопасного объекта (метана в шахте), не смотря на незначительные по объему или времени действия наладчика или даже в полной мере, зависит жизнь шахтеров в забое, т.е. взорвется или нет метановоздушная среда.

ЭС 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. Чаще всего при разработке и проектировании системы этого вида ее эффективность и надежность оценивается только по технической части. При этом эффективность ЭС 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. Анализ ряда работ под руководством профессора В.В. Севрикова, например [3, 4], в области оптимизации структур ЭС контроля и защиты объектов повышенной опасности, включая взрывоопасные и химически опасные объекты, в которых надежность технической части и человека-оператора выступает в качестве интегрального критерия оценки эффективности, помогает устранить этот недостаток. Задачи оптимизации ЭС решаются авторами отмеченных работ на основе синтеза общей теории больших технических систем. Заслуга авторов сводится к адаптации теории синтеза сложных технических систем к ЭС с учетом условий их применения и ограничений аргументов целевой функции оптимизации, вызванных нормативными требованиями условий безопасности, финансовыми и другими смысловыми ограничениями.

При синтезе системы учитывается ряд специфических особенностей, связанных с нормативными ограничениями, особенностями объектов повышенной опасности и их условий, физико-химических процессов, протекающих в системе и контролируемом объекте, что требует структуризация задачи и выбор методов ее решения.

Принимается, что структурно ЭС состоит из отдельных подсистем (технической и эргономической, т.е. человека-оператора), которые в свою очередь состоят из отдельных элементов (модулей, блоков, узлов). Считается, что каждый элемент, включая и человека-оператора, обладает всеми признаками технической динамической системы. Элементы, подсистемы и система в целом изменяются во времени и характеризуются начальным, текущим и конечным состояниями и историей развития. Поскольку принимается с обоснованным допущением, что человек-оператор в ЭС воспринимает сигналы (реакции) как и другие технические элементы и обладает всеми выше изложенными признаками технической динамической системы, то его надежность допустимо оценивать с помощью того же математического аппарата, как и надежность технической части этой системы.

Опыт показывает, что расчетная структурная надежность технических и ЭС весьма высокая по сравнению с эксплуатационной надежностью; вероятность безотказной работы их находится в пределах 0,990…0,9999. Эти данные совпадают с данными некоторых нормативных актов и стандартов, которые чаще записываются в проектах без убедительных расчетов из-за отсутствия рабочих методик таких оценок. При всем этом, ориентировочные расчетные оценки имеют право на существование, т.к. они позволяют выявлять наиболее «слабые» звенья (элементы) в системах, что побуждает разработчиков принимать решения по повышению их надежности, а, следовательно, и системы в целом – это, во-первых, а во-вторых – эти высокие расчетные значения надежности являются ориентиром, к которым следует стремиться, особенно для систем контроля и защиты объектов повышенной опасности.

Цель данной статьи – показать методику составления морфологической матрицы характеристик и свойств человека-оператора для ЭС контроля вредных веществ на взрывопожароопасных объектах.

Следуя аналогии морфологического анализа технических систем [5, 6], составляются морфологические матрицы в табличной и аналитической формах по

характеристикам, свойствам (элементам) человека-оператора с использованием известных источников эргономического и психофизиологического характера. Матрица в табличной форме составляется проектировщиком ЭС с учетом декомпозиции характеристик и свойств человека, связей между ними и с техническими элементами, влияющими на выходные показатели системы и человека, такими как надежность и эффективность. Объем и качество морфологических матриц определяются уровнем квалификации и опытом разработчика. При составлении матриц можно идти двумя путями.

Реализация первого пути возможна при большом опыте разработчика, когда он составляет укороченную по объему матрицу, включая в неё характеристики и свойства человека, соответствующие конкретному типу ЭС и конкретным условиям её применения. Другие характеристики и свойства человека, соответствующие другим типам систем, из данной матрицы исключаются. Составление укороченных матриц менее трудоемко, но эти матрицы пригодны только для конкретных условий.

Реализация второго пути возможна в том случае, когда имеется более широкая информация по характеристикам и свойствам человека, типам ЭС и различным условиям их применения. Такие матрицы по содержанию более объемные, чем первые, и они включают в себя сведения о человеке-операторе, пригодные для различного типа систем. Они более трудоемкие в составлении, но и более «долговечные». Эти матрицы корректируются при появлении новых сведений о человеке и особенностях ЭС.

Автором данной работы составлена объёмная морфологическая матрица характеристик и свойств человека-оператора в табличной форме для ЭС контроля вредных (химическиопасных и взрывопожароопасных) веществ на объектах повышенной опасности. В табл. 1 представлен образец данной матрицы.

Таблица 1. Образец морфологической матрицы характеристик человека-оператора

№	Наименование характеристики	Обозначение характеристики	№ свойсвойства	Характеристики свойства (признака)	Обозначение свойства
1	2	3	4	5	6
1	Антропометрические характеристики	X_1	1.1 … 1.46	Зона вертикальной досягаемости руки … Длина ноги в положении сидя	X_{11} … X_{146}
2	Физиологические характеристики	X_2	2.1 2.2 … 2.10	Зрительный анализатор Ближняя точка ясного видения … Речевая аудиометрия	X_{21} X_{22} … X_{210}
3	Психологические качества	X_3	3.1 … 3.3	Внимание Объём … Переключаемость	X_{31} X_{33}
4	Физические качества	X_4	4.1 4.2 4.3	Выносливость Статическая Динамическая Быстрота действия	X_{41} X_{42} X_{43}

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
5	Профессиональные качества (обучение)	X_5	5.1	Время выхода на стационарный уровень обучения	X_{51}
6	Характеристики деятельности	X_6	6.1	Время безотказной работы $P_{чо}$	X_{61}
7	Динамика работоспособности	X_7	7.1 … 7.3	Период работоспособности … Утомление	X_{71} … X_{73}

Морфологическая матрица может быть выполнена также в аналитической форме. С учетом табл. 1, она имеет следующий вид

$$|ЧО| = \begin{Vmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{N1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1M_1} & X_{2M_2} & \dots & X_{NM_n} \end{Vmatrix}.$$

По морфологической матрице в табличной форме можно построить более компактную и доступную к восприятию аналитическую матрицу структуры характеристик и свойств человека-оператора ЭС в кодовом обозначении. В полном объеме такая структура в данной публикации по естественным причинам не приводится, однако её образец имеет следующий вид

$$|ЧО| = \begin{vmatrix} X_{15} \\ \dots\dots \\ X_{16} \\ X_{120} \\ \dots\dots \\ X_{130} \\ \dots\dots \\ X_{146} \end{vmatrix} \longrightarrow \begin{vmatrix} X_{21} \\ \dots\dots \\ X_{25} \\ \dots\dots \\ X_{29} \\ X_{210} \end{vmatrix} \longrightarrow \begin{vmatrix} X_{31} \\ \dots\dots \\ X_{37} \\ \dots\dots \\ X_{310} \end{vmatrix} \longrightarrow \begin{vmatrix} X_{41} \\ \dots\dots \\ X_{43} \\ X_{44} \end{vmatrix} \longrightarrow |X_{51}| \longrightarrow \begin{vmatrix} X_{61} \\ X_{62} \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} X_{71} \\ \dots\dots \\ X_{73} \end{vmatrix}$$

Для различных ЭС не требуется весь набор характеристик и свойств человека-оператора. Для каждой из них характеристики и свойства свои, и они определяются действиями (операциями) оператора в системе.

Структурная цепочка характеристик человека-оператора сужается и укорачивается в зависимости от действий его в ЭС, которые, в свою очередь, определяются типом системы, назначением и особенностями условий её применения. Эти действия человека, могут быть собирательными, т.е. выполняются несколькими операторами. В любом случае, действия, выполняемые одним или несколькими операторами, должны быть эргономически обоснованными, т.е. взаимосогласованными с техникой и человеком. Поскольку типов эргатических систем и условий их применения большое разнообразие, то и действия операторов не могут быть однозначными, а поэтому описать их множество затруднительно и даже невозможно в данной работе. Основной идеей работы является создание подхода структурно-морфологического анализа характеристик и свойств человека-оператора в ЭС контроля вредных (химически- и взрывопожароопасных) веществ.

Теория надежности технических систем контроля и управления опережала развитие теории человеческой надежности. Развитие теории надежности технических систем базировалось на успехах совершенствования и создания новых сложных (больших) систем управления в различных отраслях хозяйственной и другой деятельности и, в первую очередь, систем оборонного назначения. В этих системах возникла необходимость оценивать состояния переходных случайных процессов и их вероятностей. В

конечном счете была создана теория синтеза сложных технических систем, в которой используются методы случайных процессов с построением графов функционирования технических элементов, морфологического анализа элементов, структурно-компоновочной и критериально-параметрической оптимизации структур, обобщенным показателем которой является надежность технической системы.

Особое значение в теории надежности технических систем имеет теория марковских случайных процессов с математическим аппаратом в виде дифференциальных уравнений, доступное решение которых достигается с применением принципа Колмогорова – нормирования финальных вероятностей состояний элементов и систем в целом.

В последнее время появился ряд работ [7, 8], в том числе и автора данной работы, в области оптимизации структур эргатических систем контроля и защиты опасных объектов, в которых надежность технической части и человека-оператора выступает в качестве объединенного критерия оценки эффективности и одного из основных аргументов. Задачи оптимизации структур эргатических систем решаются на основе синтеза общей теории больших технических систем. Заслуга авторов этих работ сводится к адаптации теории синтеза сложных технических систем к ЭС с учетом условий их применения и ограничений аргументов целевой функции оптимизации, вызванных нормативными требованиями условий безопасности, финансовыми и другими смысловыми ограничениями.

Поскольку принимается с обоснованным допущением, что человек-оператор в ЭС воспринимает сигналы (реакции) как и другие технические элементы, и обладает всеми выше изложенными признаками технической динамической системы, то его надежность допустимо оценивать с помощью того же математического аппарата, как и надежность технической части этой системы. В данном случае целесообразно привлечь: морфологический анализ характеристик человека-оператора; структурный анализ характеристик и свойств оператора в ЭС; математическое моделирование надежности человека в ЭС с привлечением аппарата марковских случайных процессов.

Выводы. Обоснована возможность представления эргатических характеристик человека-оператора в ЭС с использованием морфологического анализа по аналогии с анализом технической системы.

Разработана общая табличная морфологическая матрица характеристик оператора в ЭС контроля пожаровзрывоопасных объектах, а также представлены формы записи аналитической матрицы характеристик и свойств человека и их структурирования по характерным группам.

Учитывая, что в эргатической системе контроля пожаровзрывоопасных объектов 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 модели, используя синтез теории сложных технических систем с применением морфологического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочник* по надежности в 3-х томах под ред. Б.Р. Левина и Б.Е. Бердичевского, перевод с английского. М.: МИР, 1969. 1050 с.

2. *Meister D.* Human Reliability Production Audit, Proc. Ninth Hotl. Symp. Reliability Quality Control, 1963. pp. 184–192.

3. *Паньков Е.К.* Оптимизация эргатических систем контроля и защиты объектов повышенной опасности // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 132/2012.

Серія: Механіка, енергетика, екологія. Севастополь, 2012. С. 174–179.

4. *Одинцов А.Н., Севриков А.И.* Оптимизация структур информационно-эргатических систем контроля и защиты взрывопожароопасных объектов по временному фактору // Вісник СНУ ім. В. Даля. Луганск, 2010. № 12 (154), ч. 2. С. 139–146.

5. *Кузнецов Ю.Н.* Методические указания по применению системно-морфологического поиска новых технических решений. К.: КПИ, 1985. 60 с.

6. *Одрин В.М., Каравов С.С.* Морфологический анализ систем. К.: Наукова думка, 1973. 370 с.

7. *Швецова В.И.* Оптимизация системы «человек–машина–среда»: оценка надежности человека-оператора // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1 (43). С. 147–153.

8. *Севриков В.В., Ничкова, И.В. Севриков, В.И. Швецова.* Оптимизация структур эргатических систем контроля и защиты пожаровзрывоопасных объектов. Монография. Санкт-Петербург: Лань. 2020. 236 с.

TOPOLOGICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF A HUMAN-OPERATOR IN ERGATIC CONTROL SYSTEMS

V.I. Shvetsova

Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article presents a generalized analysis of the reliability of a human operator in ergatic control and protection systems for explosive objects. The possibility of representing the ergatic characteristics of a human operator in an ergatic system using morphological analysis by analogy with the analysis of a technical system is substantiated. A fragment of the general morphological matrix of characteristics of a human operator of an ergatic system in tabular and analytical forms is presented. A methodological approach to taking into account the human operator reliability is proposed, based on the use of morphological and structural analyzes, which consists in taking the most significant actions (functions) of a person in an ergatic system from a variety of possible characteristics.

Keywords: ergatic control system, reliability, human operator characteristics, morphological analysis.

REFERENCES

1. *Levin B.R. and Berdichevskiy B.E.*. Spravochnik po nadezhnosti v 3-h tomah (Handbook of reliability in 3 volumes), perevod s anglijskogo. Moscow: MIR, 1969, 1050 p.

2. *Meister D.* Human Reliability Production Audit, Proc. Ninth Hotl. Symp. Reliability Quality Control, 1963, pp. 184–192.

3. *Pan'kov E.K.* Optimizacija e`rgaticheskih sistem kontrolja i zashhity ob’’ektov povyshennoj opasnosti (E’rgatic control and protection systems for high-risk facilities optimization). *Visnik SevNTU: Mehanika, energetika, ekologija*, 2012, No. 132/2012, pp. 174–179.

4. *Odincov A.N.* Optimizacija struktur informacionno-e’rgaticheskih sistem kontrolja i zashhity vzryvopozha-roopasnyh ob’’ektov po vremennomu faktoru (Optimization of the structures of information-ergatic systems for control and protection of fire and explosion hazardous objects by the time factor). *Visnik SNU im. V. Dalja*, 2010, No. 12 (154), pp. 139–146.

5. *Kuznecov YU.N.* Metodicheskoe ukazanie po primeneniyu sistemno-morfologicheskogo poiska novyh tekhnicheskih reshenij (Guidelines for the use of system-morphological search for new technical solutions). Kiev: KPI, 1985, 60 p.

6. *Odrin V.M. and Karavov S.S.* Morfologicheskij analiz system (Morphological systems analysis). Kiev: Naukova dumka, 1973, 370 p.

7. *Shvecova V.I.* Optimizacija sistemy ”chelovek–mashina–sreda”: ocenka nadezhnosti cheloveka-operatora (Optimization of the "man-machine-environment" system: assessment of the human operator reliability). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2021, No. 43, pp. 147–153.

8. *Sevrikov V.V., Nichkova L.A., Sevrikov I.V., and Shvecova V.I.* Optimizacija struktur e’rgaticheskih sistem kontrolja i zashhity pozharovzryvoopasnyh ob’’ektov (Optimization of the structures of ergatic control and protection systems for fire and explosion hazardous objects). Sankt-Peterburg: Lan', 2020, 236 p.