

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Н.М. ПУЗЫРЕВ, канд. техн. наук, Д.В. МАРТЫНОВ, канд. техн. наук,
Н.Б. БАРБАШИНОВА, доцент

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: puzyrevfdpo@rambler.ru

© Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б., 2020

Создание безопасных условий труда в эргатических системах возможно лишь при учете большого количества элементов, факторов, условий, ограничений, которые взаимосвязаны и составляют сложную систему, без анализа которой невозможно достичь требуемого результата при решении задач по обеспечению или повышению требуемого уровня производственной безопасности при проектировании, создании, эксплуатации, обслуживании технических устройств, задействованных в промышленном производстве. Дается характеристика методов системного анализа, предложены пути решения прикладных задач обеспечения безопасности на производстве с использованием предпочтительных методов анализа.

Ключевые слова: системный анализ, эргатическая система, производственная безопасность, опасный производственный фактор, вредный производственный фактор.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-77-84

ВВЕДЕНИЕ

Производственная система, включающая в себя какой-либо технологический процесс, технические устройства, машины, оборудование, одним из элементов которых является человек или группы людей, осуществляющих свою деятельность, называется эргатической системой.

Термин «эргатическая система» впервые был принят в 1960 году на Первом конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению с целью обозначения систем, включающих человека, который функционирует в совокупности с комплексом технических средств. Позднее содержание данного понятия расширилось. Под эргатической системой понимают любую работающую с участием человека систему, которая включает оператора (группу операторов), используемые им технические устройства и производственную среду на рабочем месте. Эргатическая система является безопасной, если обеспечена ее защищенность от повреждений, аварий и катастроф, приводящих к нарушениям здоровья и гибели людей, а также ущербу для окружающей среды.

Обеспечение безопасности эргатических систем – приоритетная социально значимая задача для всех видов производственной деятельности и для всех специалистов, участвующих в проектировании, производстве, эксплуатации и обслуживании технических устройств, задействованных в промышленном производстве.

Результатом системных исследований безопасности эргатических систем является, как правило, обоснованный выбор вполне определенного плана действий по созданию и эксплуатации технической системы, отвечающей установленным требованиям безопасности. При этом необходимо обеспечить безопасные условия труда, т.е. исключить воздействие на работающих опасных производственных факторов, а воздействие вредных производственных факторов не должны превышать предельных допустимых значений.

Под опасными здесь понимаются такие производственные факторы, воздействие которых на работающих приводит к травме, острому отравлению либо другому внезапному резкому ухудшению здоровья или смерти. Воздействие на работника вредного фактора может привести к заболеванию, снижению работоспособности, отрицательному влиянию на здоровье потомства.

В зависимости от количественной характеристики (например, уровня излучения, звукового давления, концентрации вещества и других показателей вредности) и продолжительности воздействия вредный производственный фактор может стать опасным, в результате чего может возникнуть профессиональное заболевание.

Для решения задач по созданию безопасных условий труда, обеспечению или повышению уровня безопасности производственных объектов приходится учитывать достаточно большое количество взаимосвязанных элементов, факторов, условий, ограничений, образующих сложную структуру, без системного анализа которой невозможно достичь требуемого результата.

Системный анализ как научный метод познания представляет собой последовательность действий по установлению структурных связей между элементами исследуемых сложных систем, в том числе таких, которые обеспечивают требуемый уровень безопасности технических устройств, технологических процессов, а также безопасность персонала при их эксплуатации. Системный анализ включает в себя совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам, в данном случае по обеспечению производственной безопасности, т.е. состояния, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью персонала и окружающей среде.

Системный анализ опирается на комплекс общенаучных, экспериментальных, естественнонаучных, статистических, математических методов. Под системой понимается совокупность элементов и связей между ними [1].

Метод системного анализа заключается в целостном восприятии объекта исследования, его элементов и во всестороннем анализе связей между отдельными элементами в рамках всеобъемлющего целого. Принцип системности предполагает рассмотрение компонентов системы в их взаимосвязи, т.е. в виде целостного набора, или комплекса. Например, возгорание (пожар) как системное явление возможно при наличии как минимум такой совокупности компонентов, как горючее вещество, окислитель и источник воспламенения. Исключение хотя бы одного из названных компонентов разрушает систему. Техногенная авария в виде разлива вредного вещества возможна при наличии таких компонентов, как вредное (опасное) вещество, емкость (объект, устройство для хранения вещества), источник опасного воздействия на вещество и (или) на емкость.

Любая реальная производственная система, любой технологический процесс могут быть представлены в виде некоего образа, называемого *моделью системы*. Под

моделями понимают отображения всех характеристик, параметров систем, выполненные таким образом, чтобы они показывали их взаимосвязь. Моделирование неизбежно сопровождается некоторым упрощением и формализацией взаимосвязей в системе. Формализация может быть осуществлена в виде логических, причинно-следственных и/или математических (функциональных) отношений. При этом под *компонентами* (элементами, составными частями) системы понимаются не только материальные объекты, но и связи между ними.

ЦЕЛИ И МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Цель системного анализа производственной безопасности заключается в том, чтобы на его основе можно было выявить причины нежелательных событий, таких как возникновение аварийных ситуаций, воздействие на человека опасных и вредных производственных факторов. На основании анализа и сделанных выводов разрабатываются системы, способы, устройства защиты, предупредительные, организационные и иные мероприятия. Они предназначены для исключения, снижения вероятности появления или уменьшения до допустимых уровней воздействия вредного и/или опасного производственного фактора.

Применительно к обеспечению производственной безопасности можно использовать различные методы системного анализа. К числу методик *индуктивного* анализа относятся анализ надежности технических систем, анализ отказов и их последствий, анализ человеческого фактора при рассмотрении операций, ошибок и др.

При *дедуктивном* анализе используется метод так называемого *дерева отказов*. В этом случае причины и опасности образуют иерархические, цепные структуры или системы. Графическое изображение таких зависимостей напоминает ветвящееся дерево [2]. Построение деревьев отказов наиболее предпочтительно при выявлении причин таких нежелательных событий, как производственные аварии, пожары, дорожно-транспортные происшествия, разливы или выбросы вредных веществ и др. Для проведения дедуктивного анализа можно использовать, например, «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов» РД 03-418-012 как нормативный документ Ростехнадзора, который не содержит правовых норм и носит нормативно-технический характер.

Симплекс-метод (как разновидность системного анализа сложных систем) представляет собой итеративный процесс направленного решения системы уравнений по шагам, который начинается с опорного решения и в поисках лучшего варианта движется по угловым точкам области допустимого решения, улучшающих значение целевой функции до тех пор, пока она не достигнет оптимального значения [3]. Техническая реализация симплексного метода связана с решением систем линейных уравнений, для чего используется метод Гаусса, разработаны табличные формы и правила преобразования симплексных таблиц.

При системном анализе сложных систем, каковыми являются многие задачи повышения уровня производственной безопасности, имеются трудности в создании достоверных моделей их функционирования. При этом в ряде случаев невозможно провести надежное теоретическое обоснование систем линейных уравнений и неравенств, из-за чего применение симплекс-метода вызывает определенные сложности.

В таких случаях используется метод *экспертных оценок*. В качестве экспертов выступают специалисты в конкретных областях знаний, которые могут указать более предпочтительные варианты решений. Для обеспечения объективности оценки существуют различные способы получения экспертной информации, например парные и множественные сравнения, ранжирование, классификация. Экспертам предъявляется один или несколько компонентов системы, и они должны указать предпочтительные из этих элементов. При их ранжировании множество объектов следует упорядочить по предпочтениям. Эксперт может дать количественную оценку предпочтения. Анализ и обработку экспертной информации можно проводить с помощью математических методов.

Все перечисленные выше методы системного анализа могут применяться независимо друг от друга, но в ряде случаев наибольший эффект достигается их сочетанием. Их можно использовать на стадиях проектирования машин, оборудования, технологических процессов и производств, в процессе эксплуатации с целью повышения уровня безопасности в соответствии с меняющимися условиями и нормативно-правовыми требованиями, при модернизации производства как для всего предприятия, так и для отдельных технологических процессов и технических устройств.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим элементы системного анализа применительно к задаче снижения уровня звукового давления на сварщика в цехе сварки объемных металлических конструкций, предназначенных для строительно-дорожной техники. Под системой здесь понимается совокупность элементов и связей между ними, которые перечислены ниже.

Шум является вредным общебиологическим фактором, так как действует на весь организм человека через его нервную систему. Проявление вредного воздействия шума на организм человека весьма разнообразно.

Объективное действие шума выражается в виде ослабления внимания, повышения кровяного давления, снижения остроты слуха, учащенного дыхания и пульса, снижения работоспособности, нарушения координации движения. Субъективное действие шума проявляется в виде головокружения, головной боли, бессонницы, общей слабости. Изменения, возникающие под действием шума в организме человека, классифицируют как шумовые болезни. Длительное воздействие производственного шума на работника приводит к резкой потере слуха, тугоухости или к глухоте. Сопутствующие этому утомление, ослабление внимания, памяти являются причиной возникновения травмоопасной обстановки на рабочем месте.

При решении задачи борьбы с шумом на рабочем месте сварщика элементами системы как совокупности элементов и их связей являются:

1) *нормативно-правовая документация*, регламентирующая допустимые уровни звукового давления на рабочем месте сварщика:

 предельные уровни шума (для постоянных шумов);

 уровни звука в децибелах, которые используются для ориентировочной оценки постоянного и непостоянного шума без учета частотных характеристик;

2) *источники звукового давления*, воздействующие на сварщика:

 электрод сварочного аппарата;

 отражательные поверхности конструкций цеха, участка;

- отражательные поверхности звукоизолирующих перегородок;
резонирующая поверхность обрабатываемой металлической конструкции;
- 3) *количественные характеристики шума, звукового давления:*
спектральные характеристики шума;
уровень шума;
- 4) *защищаемый объект* – сварщик ручной сварки;
- 5) *способы и средства достижения результатов:*
- а) способы защиты:
шумопоглощение;
шумоизоляция;
- б) устройства защиты:
специальные шумопоглощающие экраны;
шумопоглощающие покрытия пола, стен, потолка, перегородок, поверхностей свариваемой конструкции;
шумоизолирующие экраны;
средства индивидуальной защиты сварщика (наушники, звукопоглощающий шлем, спецодежда);
- в) замена, модернизация сварочного оборудования:
отказ от сварки, замена технологии сварки другим видом технологии соединения деталей;
подбор режима сварки для снижения уровня звукового давления, издаваемого сварочной дугой;
установка шумопоглощающего наконечника на электрод;
- г) организационные мероприятия – сокращение длительности воздействия звукового давления на организм работающего (перерывы в работе, сокращенный рабочий день);
- б) *оценка эргономичности* принимаемых технических решений;
- 7) *оценка экологической безопасности* принимаемых вариантов решений задачи;
- 8) *оценка экономической эффективности* принимаемых вариантов решения задачи;
- 9) *оценка достаточности принимаемых мер* и адекватности получаемых результатов.

Нормативными документами, устанавливающими допустимые (предельные) уровни воздействия на защищаемый объект, являются государственные и межгосударственные стандарты, технические регламенты, нормы и правила. Они регламентируют количественную оценку опасных и вредных производственных факторов.

Например, санитарные нормы и правила (СанПиН) устанавливают предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных, наиболее типичных видов трудовой деятельности.

Количественные характеристики опасного производственного фактора характеризуются, как правило, размером материального ущерба при реализации опасности, числом пострадавших, трудовыми потерями. Количественную оценку вредного производственного фактора оценивают по таким показателям, как уровень воздействия (предельно допустимые концентрации, предельно допустимые уровни и др.). Вредный

производственный фактор оценивают также по экономическим затратам на снижение или полное устранение его влияния (например, это затраты на приобретение средств пылегазоочистки, обезвреживания, обеззараживания и их эксплуатацию, на средства индивидуальной и коллективной защиты, затраты на профилактику профессиональных заболеваний).

В случае системного анализа сложной системы, какой является задача совершенствования защиты от шума на рабочем месте сварщика, имеются, как отмечалось выше, трудности в создании достоверной модели ее функционирования, когда невозможно провести надежное теоретическое обоснование зависимостей и граничных условий. В этом случае целесообразно применять метод *экспертных оценок* принятия решений.

Информация о потенциальных возможностях снижения уровня звукового воздействия накапливается в процессе эксплуатации подобных систем, устройств, при поиске способов и средств шумопоглощения, шумоизоляции, других приемов и средств. При этом оцениваются и выявляются наиболее эффективные из них в различных аспектах – технологических, экологических, экономических, эргономических, анализируется, обосновывается и осуществляется выбор возможных решений на основе разработанных целевых показателей с учетом ресурсов, результатов оценки рисков и согласования с заинтересованными сторонами.

Практика показывает, что, например, на машиностроительных предприятиях, где ведется металлообработка, большинство материалов, из которых изготовлены объекты шумоизоляции, поглощают менее 2 % падающей на их поверхность звуковой энергии, отражая 98 % обратно в помещение. Средства индивидуальной защиты позволяют снизить уровень шума не более чем на 10...45 дБ, причем наиболее значительное глушение шума наблюдается в области высоких частот. При низких частотах такие средства неэффективны. Ушные вкладыши обеспечивают снижение шума в высокочастотных октавных полосах на 5...30 дБ. Отраженный звук увеличивает уровень шума на рабочем месте на 5...15 дБ в зависимости от свойств поверхности, отражающей звук, расстояния от него, частотных характеристик. С помощью звукопоглощающих облицовок и конструкций можно обеспечить снижение шума в помещении на 8...10 дБ. Существует и ряд других целевых показателей, характеризующих выбор и обоснование решения задачи [4].

Применение *метода экспертных оценок* для решения задачи по снижению уровня звукового давления необходимо прежде всего потому, что в процессе принятия решений приходится осуществлять выбор в ситуациях неопределенности, которая обусловлена наличием факторов, не поддающихся строгой количественной оценке. В этом случае все процедуры и методы направлены именно на поиск альтернативных вариантов решения проблемы, выявление масштабов неопределенности по каждому из них и сопоставление вариантов по тем или иным критериям эффективности.

Привлекаемые для этого эксперты подготавливают или рекомендуют существующие варианты решения, руководствуясь сформулированными и представленными выше элементами системы, совокупностью элементов и их связей. При этом количественные показатели, параметры отдельных элементов, входящих в систему, их граничные условия принимаются на основе экспериментальных или лабораторных исследований процесса либо используются уже известные показатели

аналогичных систем шумопоглощения, шумоизоляции, средств индивидуальной и коллективной защиты. Принятие окончательных вариантов решения поставленной задачи относится к компетенции соответствующего эксперта, должностного лица или нескольких ответственных лиц.

При выборе окончательных вариантов можно использовать *морфологический анализ* [5]. В его основе лежит упорядочение процесса выдвижения и рассмотрения различных вариантов решения задачи. Суть метода состоит в том, что в системе выделяют несколько существенных (структурных или функциональных) признаков. Каждый из них может характеризовать какой-либо параметр или свойство системы, от которых зависит решение проблемы. По каждому выделенному признаку составляют список его различных вариантов-альтернатив. Признаки с альтернативами располагают в таблицу – «морфологический ящик». Перебирая всевозможные сочетания этих альтернатив, можно выявить наиболее предпочтительные или новые варианты решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При решении задач обеспечения или повышения уровня производственной безопасности в эргатических системах при эксплуатации машин, оборудования приходится учитывать большое число элементов, факторов, условий, ограничений, составляющих достаточно сложную систему. Применение методов системного анализа позволяет наиболее полно и объективно оценить совокупность элементов и связей между ними. Предложено использование методов системного анализа в случаях аварийных ситуаций. На примере решения прикладной задачи по снижению уровня звукового воздействия на персонал в сварочном производстве указана совокупность элементов, которые необходимо учитывать. Обосновано применение различных методов системного анализа, в том числе метода экспертных оценок с применением морфологического метода, что позволяет наиболее объективно и полно оценить опасные и вредные производственные факторы, влияющие на уровень производственной безопасности в эргатических системах, и разработать мероприятия по снижению уровня их воздействия на персонал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техно-сфере. М.: Академия, 2003. 512 с.
2. Пузырев Н.М., Любимова Н.С. Производственная безопасность: учебное пособие. Ч. 1. Тверь: ТГТУ, 2008. 218 с.
3. Таха Х.А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
4. Юдин Е.Я., Борисов Л.А., Горенштейн И.В. Борьба с шумом на производстве: справочник / под ред. Е.Я. Юдина. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
5. Мухин В.И. Исследование систем управления: учебник. М.: Экзамен, 2003. 384 с.

Для цитирования: Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б. Системный анализ при решении задач производственной безопасности в эргатических системах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 77–84.

SYSTEM ANALYSIS IN SOLVING THE PROBLEMS OF PRODUCTION SAFETY IN ERGATIC SYSTEMS

N.M. PUZYREV, Cand. Sc., D.V. MARTYNOV, Cand. Sc.,
N.B. BARBASHINOVA, Lecturer

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: puzyrevfdpo@rambler.ru

Creating safe working conditions in ergatic systems is possible only when taking into account a large number of elements, factors, conditions, restrictions that make up a complex interconnected system, without analysis of which it is impossible to achieve the desired result in solving problems of ensuring or increasing the required level of industrial safety during design, creation, operation, maintenance of technical devices involved in industrial production. The characteristic of system analysis methods is given, ways of solving applied problems of ensuring safety at work using the preferred methods of analysis are proposed.

Keywords: system analysis, ergatic system, industrial safety, hazardous production factor, harmful production factor.

REFERENCES

1. Belov P.G. Sistemnyy analiz i modelirovaniye opasnykh protsessov v tekhnosfere [System analysis and modeling of hazardous processes in the technosphere]. Moscow: Akademiya, 2003. 512 p.
2. Puzyrev N.M., Lyubimova N.S. Proizvodstvennaya bezopasnost': uchebnoye posobiye. Ch. 1. [Industrial Safety: a textbook. Part 1]. Tver: TvGTU, 2008. 218 p.
3. Taha H.A. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy. [Introduction to operations research]. Moscow: Vilyams, 2005. 912 p.
4. Yudin E.Ya., Borisov L.A., Gorenstein I.V. Borba s shumom na proizvodstve: spravochnik [The fight against noise in production: a guide] / ed. E.Ya. Yudin. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. 400 p.
5. Mukhin V.I. Issledovaniye sistem upravleniya: uchebnik. [The study of control systems: a textbook]. Moscow: Ekzamen, 2003. 384 p.

Поступила в редакцию/received: 26.06.2020; после рецензирования/revised: 16.10.2020;
принята/accepted 15.11.2020