УДК 004.89

DOI: 10.35330/1991-6639-2021-4-102-17-27

MSC: 93-10/2020

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ АНАЛИТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

И.И. БОСИКОВ^{1, 2}

¹ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт»
(государственный технологический университет)
362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44
E-mail: info@skgmi-gtu.ru

²ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
414056, Астрахань, ул. Татищева, 16
E-mail: post@astu.org

В статье рассматривается сложная техническая система переменной структуры (СТС ПС), обладающая: сложностью, многокомпонентностью, множеством количественно-качественных параметров; сложностью экспериментальных исследований, рисками возникновения опасных ситуаций и катастрофичностью их последствий; уникальностью режимов и условий функционирования систем. Особенности таких систем обуславливают специфику их анализа и моделирования: невозможность создания и использования общих аналитических моделей; сложность обеспечения достоверности моделирования из-за уникальности, недостаточности данных об опасных и аварийных режимах функционирования СТС ПС. Эти особенности позволяют обосновать целесообразность комбинирования различных подходов и методов для построения и композиции единой модели системы из моделей отдельных ее компонентов. Предлагаемый принцип построения систем существенно расширяет возможности управления процессом функционирования СТС ПС вследствие гибкого использования полезных свойств каждой из структур в зависимости от внутреннего состояния системы и изменяющихся внешних условий. Типичным примером СТС ПС является система воздухооборудования угольных шахт. Конфигурация указанной системы должна постоянно изменяться, адаптируясь как к изменению структуры и объемов самих забоев, так и в связи с возможным изменением параметров технических устройств нагнетания воздуха в шахты (вплоть до их полного выхода из строя).

Целью работы является разработка универсальной аналитико-статистической модели расчета показателей надежности и комплексной оценки сложных технических систем переменной структуры.

Новизна заключается в том, что разработана универсальная аналитико-статистическая модель определения граничных значений показателей надежности и расчета пессимистической и оптимистической оценки, которая отличается тем, что в ней учтены особенности функционирования невозстанавливаемых и восстанавливаемых, избыточных и неизбыточных технических систем при отказах и восстановлении элементов при воздействии различных случайных параметров, что позволяет рассчитать надежность функционирования СТС ПС и оценить эффективность применения мер структурного резервирования.

Ключевые слова: аналитико-статистическая модель, сложная техническая система переменной структуры, показатели надежности, пессимистическая и оптимистическая оценка, структурное резервирование, надежность.

Поступила в редакцию 12.07.21

Для цитирования. Босиков И.И. Разработка универсальной аналитико-статистической модели расчета показателей надежности и комплексной оценки сложных технических систем переменной структуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 4(102). С. 17-27.

ВВЕДЕНИЕ

Основными организаторами работ по развитию теории надежности, в том числе прикладной, в России стали академик А.И. Берг, Я.М. Сорин, создавшие первый отдел надежности, в котором работали известные ученые – профессора Б.Р. Левин и Я.Б. Шор. Большой вклад в исследование и анализ надежности СТС внесли Б.В. Гнеденко, А.Д. Соловьев, Ю.К. Беляев, А.Е. Александрович, Ю.В. Бородакия, В.О. Чуканов, Ю.Н. Фёдоров и другие ученые. Работы данных авторов стали классическими и заложили основы теории надежности. Немаловажным аспектом изучения в данной области выступает анализ структуры СТС в целом. Фундаментальными работами в данной области являются исследования таких специалистов, как А.А. Денисов, В.С. Анфилов, А.А. Амосов, Ф.А. Байхельт, Е.Ю. Бартилович, Л.П. Глазунов, А.Д. Цвиркун, О.И. Бронштейн, И.А. Ушаков, С.В. Гуров, Д. Нейман, Ч.С. Пирс, Р. Барлоу, Ф. Прошан, Т.Л. Саати и др. Названными российскими и иностранными учеными исследованы различные вопросы оптимизации анализа и синтеза структуры СТС. Кроме того, данными авторами изучены вопросы построения многоступенчатых систем оперативного управления, а также вопросы оценки эффективности функционирования таких систем с позиций теории надежности.

Однако особенности СТС ПС не дают возможность в полной мере применить для расчета надежности их функционирования имеющиеся в работах указанных ученых подходы и разработанный ими математический аппарат. Это связано с тем, что существующие методы не позволяют рассчитывать надежность систем, которые подвержены изменениям структуры, обладают большим количеством состояний и сложным характером переходов между этими состояниями. Кроме того, в СТС ПС динамично изменяются границы между предаварийными и аварийными состояниями. Необходимо также учесть влияние различных законов распределения отказов элементов на надежность системы в целом, учесть влияние последствий таких отказов, возможность рассинхронизированной работы элементов и подсистем, влияние процессов подключения резервных и дублирующих подсистем. Расчет параметров надежности часто должен вестись в режиме реального времени, в условиях жестких ограничений, накладываемых аварийными и предаварийными ситуациям, когда от своевременно принятых решений зависят здоровье и жизнь людей. Задачи в такой постановке в теории надежности не рассматривались.

Для повышения надежности функционирования СТС в различных отраслях промышленности (в частности, на предприятиях угольной промышленности) применяются СТС переменной структуры (СТС ПС). Они содержат в своем составе специальные устройства (регуляторы), которые могут разрывать или восстанавливать связи между отдельными подсистемами или функциональными элементами, изменяя тем самым конфигурацию системы (например, подключая дублирующие или резервные устройства) [1–4].

К системам данного класса относится система воздухообеспечения угольных шахт. Указанные выше свойства таких СТС ПС обуславливают специфику подходов к их анализу и моделированию: отсутствие единого подхода для создания и использования общих аналитических моделей СТС ПС, учитывающих особенности всех компонентов и процессов, моделируемых СТС ПС; недостаточность данных и невозможность непосредственно-

го анализа опасных и аварийных режимов и условий функционирования СТС ПС; закрытость, конфиденциальность и сложность получения сведений об СТС ПС.

Свойства СТС ПС и особенности их моделирования позволяют использовать различные подходы и методы для построения модели СТС ПС из моделей отдельных ее компонентов [2–7].

Спецификой управления СТС ПС являются: управление выполняется по параметрам (например, по количеству подаваемого воздуха вентиляторами, аэродинамические показатели, показатели, влияющие на воздухообеспечение шахт, которые не регистрируются регуляторами, материальные потоки (воздуха, электроэнергии) и др.) с учетом условий безопасности, без оптимизации эффективности; представляет собой выработку и реализацию различных последовательностей управляющих организационно-технических решений по переходу в целевую ситуацию в зависимости от стратегии управления; неполнота данных о СТС ПС, сложность формализации критериев эффективности управления СТС ПС; выполнение дополнительных требований при переходе через промежуточные ситуации (например, для обеспечения безопасности, сокращение времени на переход из одного состояния в другое); ошибки управления могут быть при аварийных ситуациях, что приводит к негативным последствиям СТС ПС; необходимость адаптации управления к изменению структуры и параметров в процессе функционирования СТС ПС, системных и внешних факторов; инерционный характер функционирования СТС ПС, снижающий требования к оперативности управляющих воздействий; задачи и процессы моделирования и управления СТС ПС, как правило, обособлены друг от друга [1–8].

Цель и задачи исследования. Разработка универсальной аналитико-статистической модели расчета показателей надежности и комплексной оценки сложных технических систем переменной структуры.

Методы исследования: решение поставленных задач базируется на современных методах математической статистики; теории графов; теории принятия решений; аппарате математической логики; факторного анализа; математическом моделировании; теории множеств; теории надежности и системном анализе.

Результаты исследования. Методом последовательной идентификации получена универсальная аналитико-статистическая модель определения граничных значений показателей надежности и расчета пессимистической и оптимистической оценки СТС ПС, у которой изменяются параметры при переменной структуре [10–14].

При проведении исследований получены как обобщенные, так и проверенные экспериментами данные.

Далее исследованы числовые характеристики и качественные свойства СТС ПС, при этом задача сводится к изучению процесса управления воздухообеспечением на угольных шахтах.

Проведены пессимистическая и оптимистическая оценки СТС ПС, после чего составлена структурная схема управления воздухообеспечением на угольных шахтах (рис. 1). На основе схемы методом последовательной идентификации получена универсальная аналитико-статистическая модель [6–14].

Рис. 1. Структурная схема управления воздухообеспечением СТС ПС

Для решения поставленной задачи использовался метод декомпозиции, система была разделена на две подсистемы Q_1 и Q_2 , что позволило решить задачи отдельно и упростить решение вопроса надежности управления воздухообеспечением СТС ПС. Проведено моделирование, удовлетворяющее условиям: аддитивность целевой функции; блочный характер ограничений; наличие межблочных связей [10–18].

Модели подсистем Q_1 и Q_2 разделяются на отдельные блоки, процесс воздухораспределения разбит на две части, при этом проще определить критерии и связи между ними.

Для определения граничных значений показателей надежности и расчета пессимистической и оптимистической оценки СТС ПС, у которой изменяются параметры при переменной структуре, найдены и обоснованы критерии эффективности. Критерии комплексно учитывают все показатели надежности СТС ПС. Разработанная универсальная аналитико-статистическая модель учитывает комплекс обобщенных критериев рассматриваемых подсистем.

Условные обозначения (рис. 2): P_{IZ} – приборы для проведения измерений; Q_1 и Q_2 – подсистемы СТС ПС; U_{VC} – данные по внешнему состоянию подсистемы СТС ПС; P_Y – аэродинамические показатели; $R(t)$ – показатели, влияющие на воздухообеспечение шахт, которые не регистрируются регуляторами; U_{RP} – регуляторы подачи воздуха в шахту; K_{MP} – материальные потоки (воздуха, электроэнергии) для обеспечения проветривания; V_{WS} – система воздухообеспечения.

Рис. 2. Схема универсальной аналитико-статистической модели

В зависимости от комплекса обобщенных критериев происходят и перемены структуры СТС ПС, отмечается изменение управления системы воздухообеспечения угольных шахт:

$$\zeta_k = \sum_{i=1}^n \varphi_i^k \cdot Q_i^k; \quad \xi = \min(\xi_k); \quad \alpha \in \{1, 2, \dots\}; \quad \varphi_i^k \in \varphi^+ = \begin{cases} \varphi_i \geq 0 \\ \sum_{i=1}^n \kappa_i = 1 \end{cases},$$

где ζ_k – критерий при изменении n -й структуры, $k = 1, 2, \dots$, при n признакам Q_i^k – отказ, потери, надежность; φ_i^k – коэффициенты выбора критериев системы.

Для разработки универсальной аналитико-статистической модели учтен комплекс обобщенных критериев рассматриваемых подсистем, это разнообразные критерии качества: аэродинамические, аппаратурные и т. д. Также обоснованы и выбраны универсальные критерии, где основные показатели безопасности – качество воздуха, его объем, стоимость расхода электроэнергии на проветривание, потери при аварии [18–20].

Комплексный выбор показателей, характеризующих эффективность функционирования СТС ПС с точки зрения надежности, зависит от многих параметров, в том числе и от объекта исследования.

При рассмотрении системы воздухообеспечения учитываются следующие показатели: для отдельных элементов оборудования время наработки на отказ, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности.

Для определения граничных значений показателей надежности и расчета пессимистической и оптимистической оценки СТС ПС, у которой изменяются параметры при переменной структуре, предлагается универсальная аналитико-статистическая модель:

$$G_y = \delta_1 \cdot A(Z) + \delta_2 \cdot U(V_s) - \delta_3 \cdot U(P_{sN}) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – метрологические коэффициенты; $F(Z)$ – факторные показатели; Z – вероятные затраты на предполагаемую технологию и организацию производственных процессов; $U(P_{SN})$ – граничные значения показателей надежности P_{CN} ; $U(V_s)$ – количество подаваемого в шахту воздуха – V_s для эффективного функционирования СТС ПС.

Универсальная аналитико-статистическая модель (1) имеет различные формы и используется в различных отраслях промышленности.

Преимущество перед другими – возможность оценивать эффективность применения мер структурного резервирования, $\min$ затраты, $\min$ общие потери при ограничениях по функционированию и мониторинг.

При реализации универсальной аналитико-статистической модели необходимо: вести контроль аэродинамических параметров, характеризующих качество воздуха; принимать во внимание значение зависимости между показателем воздухообеспечения и оперативностью управляющих воздействий; знание зависимости между качеством и затратами воздухообеспечения угольных шахт [16–20].

Универсальная аналитико-статистическая модель (1) в зависимости от конкретных условий и особенностей проветривания может иметь различные формы:

- $\max$ живучести (подаваемого в шахту воздуха) при ограничениях по стоимости электроэнергии;
- $\max$ информативности (о качестве шахтной атмосферы) при ограничениях по живучести (количеству воздуха) и стоимости его подачи;
- $\min$ стоимости или суммарных потерь при ограничениях по живучести и информативности (количеству и качеству).

Таким образом, информативность, живучесть, стоимость подаваемого воздуха являются основными составными элементами и в то же время конкретными формами универсальной аналитико-статистической модели (1).

Применение универсальной аналитико-статистической модели при комплексной оценке надежности СТС ПС имеет некоторые недостатки, это связано с тем, что необходимы:

- контроль величин, характеризующих качество воздуха и других параметров, входящих в (1);
- значение зависимости между показателем качества проветривания и величиной управляющих воздействий, т.е. оперативность управления;
- знание зависимости между качеством и «ценой» шахтной атмосферы.

Основным показателем качества проветривания является безопасность ведения горных работ в течение эксплуатации шахты.

Аналитико-статистическая модель дополняется формулами расчета вышеуказанных показателей надежности для различных вариантов вентиляции, полученных при проведении активного эксперимента [16–24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная универсальная аналитико-статистическая модель отличается тем, что в ней учтены особенности функционирования невосстанавливаемых и восстанавливаемых, избыточных и неизбыточных технических систем при отказах и восстановлениях элементов при воздействии различных случайных параметров, что позволяет определять методы повышения надежности СТС ПС и оценивать эффективность применения мер структурного резервирования.

Разработано приложение программного обеспечения (ПО), которое позволяет оценивать характеристики надежности СТС ПС с достаточной точностью и быстродействием. Имея достаточно простой интерфейс, оно позволяет производить расчеты систем, представленных несколькими тысячами элементов. Точность расчетов определяется характером вычислений. Для малых систем ($n < 15$) существует ускоренный режим, производящий расчеты с погрешностью вычисления K_T около ± 0.01 . Для расчетов в обычном режиме погрешность на несколько порядков меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
2. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
3. Алтунин А.А. Теоретическое и практическое применение методов принятия решений в условиях неопределенности. Том 1. Общие принципы принятия решений в условиях различных видов неопределенности. М.: Издательские решения, 2019. 484 с.
4. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Мн.: ДизайнПРО, 2004. 640 с.
5. Борисов В.В., Мисник А.Е. Комбинированный нейросетевой способ моделирования для оперативного управления сложными системами // Информационные технологии. 2012. № 7. С. 69–72.
6. Поспелов Д.А. Большие системы. Ситуационное управление. М.: Знание, 1975. 64 с.
7. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
8. Klyuev R.V., Bosikov I.I. Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories. In the collection: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings 2. 2016. P. 791420.
9. Босиков И.И., Ключев Р.В., Гаврина О.А. Разработка интегрированной системы, включающей алгоритмы и методы анализа надежности промышленно-технической системы. Материалы второй Международной научной конференции, посвященной 25-летию юбилею Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук. 2018. С. 160–166.
10. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Revazov V.C. System analysis of power consumption by nonferrous metallurgy enterprises on the basis of rank modeling of individual technologies. In the collection: MATEC Web of Conferences. 2018. P. 04018.
11. Босиков И.И., Аликов А.Ю., Босиков В.И., Смелков З.А. Исследование закономерностей функционирования природно-промышленной системы горно-перерабатывающего комплекса с помощью математических моделей // Перспективы науки. 2012. № 1 (28). С. 70–72.
12. Jones M., Viola P. Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision. 2004. 57(2). Pp. 137–154.
13. Fleuret F. and Geman D. Coarse-to-fine face detection // Int. J. Computer Vision. 2001. 41:85–107.
14. Weinzman C. Distributed Micro / Minicomputer Systems. New Jersey: Prentice Hall Inc. 1982. 403 p.
15. Машинцов Е.А., Котлеревская Л.В., Криничная Н.А. Управление вентиляцией в угольной шахте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 188–195.
16. Скопинцева О.В., Баловцев С.В. К вопросу оценки аэрологического риска при различных схемах вентиляции выемочных участков угольных шахт // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2013. № 1. С. 87–100.

17. Каледина Н.О. Обоснование параметров систем вентиляции высокопроизводительных угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 7. С. 261–271.
18. Бахвалов Л.А., Баранникова И.В., Агабубаев А.Т. Анализ современных систем автоматического управления проветриванием // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 7. С. 22–28.
19. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н., Ажмухамедов И.М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. № 1. С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.
20. Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты // Компьютерные исследования и моделирование. 2011. Т. 3. № 2. С. 155–163.
21. Машинов Е.А., Котлеревская Л.В., Криничная Н.А. Управление вентиляцией в угольной шахте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 188–195.
22. Харик Е.К., Астанин А.В. Численное исследование вентиляции горной выработки угольной шахты в трехмерной постановке // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-5. С. 2567–2569.
23. Рычковский В.М., Сергеев О.А., Тюрин В.П. Об управлении вентиляцией на угольных шахтах Кузбасса // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 11. С. 8–9.
24. Sjöström S., Klintenäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // International Journal of Mining Science and Technology, 2020, Vol. 30. Issue 4. Pp. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016.

REFERENCES

1. Buslenko N.P. *Modelirovanie slozhnyh sistem* [Modeling of complex systems]. Moscow, Nauka, 1978. 400 p.
2. Samarsky A.A., Mikhailov A.P. *Matematicheskoe modelirovanie. Idei. Metody. Primery* [Mathematical modeling. Ideas. Methods. Examples. 2nd ed.] Moscow, Fizmatlit, 2001. 320 p.
3. Altunin A.A. *Teoreticheskoe i prakticheskoe primeneniye metodov prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennosti*. Tom 1. *Obshchie principy prinyatiya resheniy v usloviyakh razlichnykh vidov neopredelennosti* [Theoretical and practical application of decision-making methods in conditions of uncertainty. Volume 1. General principles of decision-making in conditions of various types of uncertainty]. M.: Izdatel'skie resheniya, 2019. 484 p.
4. Tarasik V.P. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem* [Mathematical modeling of technical systems]. Minsk, Dizajn PRO, 2004. 640 p.
5. Borisov V.V., Misnik A.E. *Kombinirovannyj nejrosetevoy sposob modelirovaniya dlya operativnogo upravleniya slozhnyimi sistemami* [Combined neural network modeling method for operational management of complex systems]. Information Technologies, 2012. No. 7. Pp. 69–72.
6. Pospelov D.A. *Bol'shie sistemy. Situacionnoe upravlenie* [Big systems. Situational management]. Moscow: Znanie, 1975. 64 p.
7. Pospelov D.A. *Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika* [Situational control: theory and practice]. Moscow: Nauka, 1986. 288 p.
8. Klyuev R.V., Bosikov I.I. Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories. In the collection: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings 2. 2016. P. 7911420.
9. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Gavrina O.A. *Razrabotka integrirovannoy sistemy, vkluchayushchey algoritmy i metody analiza nadezhnosti promyshlennno-tekhnicheskoy sistemy. Materialy vtoroy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchonnoy 25-letnemu yubileyu Kabardino-*

Balkarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Development of an integrated system that includes algorithms and methods for analyzing the reliability of an industrial and technical system. Materials of the second International Scientific Conference dedicated to the 25th anniversary of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2018. Pp. 160–166.

10. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Revazov V.C. System analysis of power consumption by nonferrous metallurgy enterprises on the basis of rank modeling of individual techno enosis castes. In the collection: MATEC Web of Conferences. 2018. P. 04018.

11. Bosikov I.I., Alikov A.Yu., Bosikov V.I., Smelkov Z.A. *Issledovaniye zakonomernostey funktsionirovaniya prirodno-promyshlennoy sistemy gorno-pererabatyvayushchego kompleksa s pomoshch'yu matematicheskikh modeley* [Investigation of the regularities of the functioning of the natural and industrial system of the mining and processing complex using mathematical models] // Science perspectives. 2012. No. 1 (28). Pp. 70–72.

12. Jones M., Viola P. Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision. 2004. 57(2). Pp. 137–154.

13. Fleuret F. and Geman D. Coarse-to-fine face detection // International Journal of Computer Vision. 2001. 41:85–107.

14. Weinzman C. Distributed Micro / Minicomputer Systems. New Jersey: Prentice Hall Inc. 1982. 403 p.

15. Mashintsov E.A., Kotlrevskaya L.V., Krinichnaya N.A. *Upravleniye ventilyatsiyey v ugol'noy shakhte* [Ventilation control in a coal mine] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News Tula State University. Technical science]. 2014. No. 7. Pp. 188–195.

16. Skopintseva O.V., Balovtsev S.V. *K voprosu otsenki aerologicheskogo riska pri razlichnykh skhemakh ventilyatsii vvyemochnykh uchastkov ugol'nykh shakht* [On the issue of assessing the aerological risk for various ventilation schemes of coal mine excavation areas] // *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University]. 2013. No. 1. Pp. 87–100.

17. Kaledina N.O. *Obosnovaniye parametrov sistem ventilyatsii vysokoproizvoditel'nykh ugol'nykh shakht* [Justification of the parameters of ventilation systems of high-performance coal mines] // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2011. No. 7. Pp. 261–271.

18. Bahvalov L.A., Barannikova I.V., Agabubayev A.T. *Analiz sovremennykh sistem avtomaticheskogo upravleniya provetrivaniyem* [Review of the modern systems of automated ventilation control] // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2017. No. 7. Pp. 22–28.

19. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Azhmukhamedov I.M. *Razrabotka metodov i sredstv upravleniya aerogazodinamicheskimi protsessami na dobychnykh uchastkakh* [Development of methods and management tools aerogas dynamics processes at mining sites] // *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories]. 2021. No. 1. Pp. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021- 13-1-77-83.

20. Vasenin I.M., Shrager E.R., Krainov A.Yu., Paleev D.Yu., Lukashov O.Yu., Kosterenko V.N. *Matematicheskoye modelirovaniye nestatsionarnykh protsessov ventilyatsii seti vyrabotok ugol'noy shakhty* [Mathematical modeling of non-stationary ventilation processes of the coal mine workings network] // *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling]. 2011. V. 3. No. 2. Pp. 155–163.

21. Mashintsov E.A., Kotlrevskaya L.V., Krinichnaya N.A. *Upravleniye ventilyatsiyey v ugol'noy shakhte* [Management of ventilation in the coal mine as difficult system] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News Tula State University. Technical science]. 2014. No. 7. Pp. 188–195.

22. Kharik E.K., Astanin A.V. *Chislennoye issledovaniye ventilyatsii gornoy vyrabotki ugol'noy shakhty v trekhmernoy postanovke* [Numerical study of ventilation of a coal mine in a three-dimensional setting] // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky]. 2011. No. 4–5. Pp. 2567–2569.

23. Rychkovsky V.M., Sergeev O.A., Tyurin V.P. *Ob upravlenii ventilyatsiyey na ugol'nykh shakhtakh Kuzbassa* [On ventilation control at coal mines of Kuzbass] // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Industrial safety]. 2004. No. 11. Pp. 8–9.

24. Sjöström S., Klintenäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. V. 30. Issue 4. Pp. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016.

DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL ANALYTICAL-STATISTICAL MODEL FOR CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS AND INTEGRATED ASSESSMENT OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF VARIABLE STRUCTURE

I.I. BOSIKOV^{1, 2}

¹North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
362021, North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, 44 Nikolaev str.

E-mail: info@skgmi-gtu.ru

²Astrakhan State Technical University
414056, Astrakhan, 16 Tatishcheva str.

E-mail: post@astu.org

The article deals with a complex technical system of variable structure (CTS VS), which has: complexity, multicomponent, many quantitative and qualitative parameters; the complexity of experimental studies, the risks of hazardous situations and the catastrophic nature of their consequences; the uniqueness of the modes and conditions of the systems functioning. The peculiarities of such systems determine the specifics of their analysis and modeling: the impossibility of creating and using general analytical models; the complexity of ensuring the reliability of modeling due to the uniqueness, insufficient data on hazardous and emergency modes of operation of the CTS VS substation. These features make it possible to substantiate the advisability of combining various approaches and methods for constructing and composing a unified model of the system from the models of its individual components. The proposed principle of constructing systems significantly expands the possibilities of managing the process of functioning of the CTS VS due to the flexible use of the useful properties of each of the structures, depending on the internal state of the system and changing external conditions. A typical example of CTS VS is the air supply system of coal mines. The configuration of this system must constantly change, adapting both to a change in the structure and volumes of the faces themselves, and in connection with a possible change in the parameters of technical devices for pumping air into mines (up to their complete failure).

The aim of the work is to develop a universal analytical and statistical model for calculating reliability indicators and a comprehensive assessment of complex technical systems of variable structure.

The novelty lies in the fact that a universal analytical and statistical model has been developed for determining the boundary values of reliability indicators and calculating a pessimistic and optimistic assessment, which differs in that it takes into account the features of the functioning of non-recoverable and recoverable, redundant and non-redundant technical systems in case of failures and restorations of elements during the influence of various random parameters, which makes it possible to calculate the reliability of the functioning of the CTS VS of the substation and evaluate the effectiveness of the application of measures of structural redundancy.

Keywords: analytical and statistical model, complex technical system of variable structure, reliability indicators, pessimistic and optimistic assessment, structural redundancy, reliability.

Received by the editors 12.07.21

For citation. Bosikov I.I. Development of a universal analytical-statistical model for calculation of reliability indicators and integrated assessment of complex technical systems of variable structure // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021. No. 4 (102). Pp. 17-27.

Сведения об авторе:

Босиков Игорь Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Прикладная геология» Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

362021, РСО-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44.

Докторант Астраханского государственного технического университета.

414056, Астрахань, ул. Татищева, 16.

E-mail: igor.boss.777@mail.ru

Information about the author:

Bosikov Igor Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University).

362021, North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, 44 Nikolaeva str.

Doctoral student of Astrakhan State Technical University.

414056, Astrakhan, 16 Tatishcheva str.

E-mail: igor.boss.777@mail.ru