Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2023, Том 15, № 4 / 2023, Vol. 15, Iss. 4 https://esj.today/issue-4-2023.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/54SAVN423.pdf

2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Царькова, Е. Г. Математическая модель управления надежностью технических устройств на химически опасных объектах УИС / Е. Г. Царькова // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 4. — URL: https://esj.today/PDF/54SAVN423.pdf

For citation:
Tsarkova E.G. Mathematical model of reliability management of technical devices at chemically hazardous facilities of the Penal System. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(4): 54SAVN423. Available at: https://esj.today/PDF/54SAVN423.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 504

Царькова Евгения Геннадьевна
ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнений наказаний», Москва, Россия
Ведущий научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Тверь, Россия
Кандидат физико-математических наук
E-mail: university69@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=252048

Математическая модель управления надежностью технических устройств на химически опасных объектах УИС

Аннотация. В последние годы рост мощностей технологического оборудования на химически опасных объектах УИС, усложнение производственных систем, процессы внедрения новых технических средств становятся причиной возникновения аварий на потенциально опасных производствах и могут приводить к массовой гибели, отравлению людей и животных, нанесению существенного вреда здоровью, тяжелым экологическим последствиям, существенному экономическому ущербу для городского хозяйства. Обострение проблем промышленной безопасности на объектах УИС связано с ростом крупномасштабных химических производств в непосредственной близости к месту проживания людей, увеличением содержания опасных веществ в технологических аппаратах и в том числе, ростом техногенных угроз, реализация которых может приводить к взрывам, пожарам, сопровождающимся токсическими выбросами и иными разрушительными явлениями. Обеспечение высокого уровня надежности технических устройств, средств противоаварийной защиты, эффективная и своевременная организация планово-предупредительных мероприятий, связанных с управлением надежностью технологического оборудования на химически опасных объектах, является крайне актуальной задачей, от успешного решения которой зависит возможность снижения уровня техногенных угроз и вероятности негативных последствий, связанных с их реализацией. В настоящее время существует потребность в разработке математических моделей управления надежностью технических систем в ходе их эксплуатации. В работе рассматривается актуальная и практически значимая задача управления надежностью техническими системами потенциально опасных объектов. Предложена модель оптимального управления техническим средством химически опасного объекта, сформулированы необходимые условия оптимальности для решения рассматриваемой оптимизационной задачи. Разработан алгоритм численного решения сформулированной задачи оптимального управления, приведены результаты апробации реализованного алгоритма.

Итогом данного исследования является разработанный подход к определению оптимальной стратегии управления обслуживанием технических устройств в целях обеспечения производственной безопасности на химически опасных объектах УИС. Предложен алгоритм решения задачи численными методами, обеспечивающий оперативное получение оптимального решения в широком диапазоне параметров.

Ключевые слова: экологическая безопасность; химически опасный объект; производственная деятельность; трудовая адаптация; математическая модель; задача оптимального управления; необходимые условия оптимальности; метод быстрого автоматического дифференцирования; уголовно-исполнительная система Российской Федерации

Введение

Одним из ключевых факторов обеспечения промышленной безопасности на химически опасных объектах уголовно-исполнительной системы Российской Федерации служит надежность технических средств, используемых на потенциально опасных производствах. Рост мощностей технологического оборудования, усложнение производственных систем, процессы внедрения новых технических средств становятся причиной возникновения аварий на потенциально опасных производствах и могут приводить к массовой гибели, отравлению людей и животных, нанесению существенного вреда здоровью, тяжелым экологическим последствиям, существенному экономическому ущербу. Обострение проблем промышленной безопасности на объектах УИС связано с ростом крупномасштабных химических производств, увеличением содержания опасных веществ в технологических аппаратах и в том числе, ростом техногенных угроз, реализация которых может приводить к взрывам, пожарам, сопровождающимся токсическими выбросами и иными разрушительными явлениями [1–3].

В связи с этим мониторинг надежности оборудования, средств противоаварийной защиты, эффективная и своевременная организация планово-предупредительных мероприятий, связанных с управлением надежностью технических средств, применяемых на химически опасных объектах УИС, является крайне актуальной задачей, требующей разработки математических моделей управления надежностью и методов их решения в целях обеспечения качественной информационной поддержки деятельности лиц, принимающих управленческие решения в части обеспечения промышленный и экологической безопасности [4; 5].

Методы

Рассмотрим модель нерезервированного, непрерывно контролируемого в процессе обслуживания технического устройства, применяемого в производственном процессе на потенциально опасном объекте. Полагаем, что в каждый момент времени рассматриваемое техническое устройство может находиться в состоянии готовности к работе (*«Г»*) либо в состоянии отказа (*«О»*). Полагаем, что техническая система переходит в состояние готовности с вероятностью P_1, в состояние отказа — с вероятностью P_2. При возникновении отказа (переход *«Г-О»*) осуществляется немедленный переход к восстановлению его готовности (переход *«О-Г»*). Соответствующий граф состояний для системы обслуживания технического устройства представлен на рисунке 1.

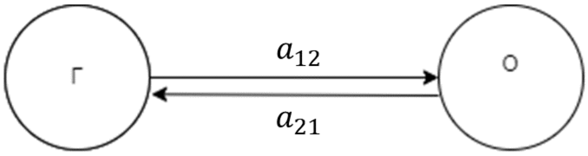

***Рисунок 1.** Граф состояний непрерывно контролируемых нерезервированных технических устройств (составлено автором)*

Для описания динамики перехода рассматриваемой технической системы в указанные состояния воспользуемся системой дифференциальных уравнений Колмогорова для систем с непрерывным временем и дискретным множеством состояний, полагая при этом, что поток отказов является пуассоновским [6; 7]. Для представленного на рисунке 1 графа состояний соответствующая система уравнений имеет следующий вид [3]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -a_{12}P_1(t) + a_{21}P_2(t), \\ \frac{dP_2}{dt} &= -a_{12}P_2(t) + a_{12}P_1(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $t \in [0, T]$ — время эксплуатации устройства; $a_{12} = \omega_{НП}$; $a_{21} = \frac{1}{T_{устр}^{НП}} = \mu$; $\omega_{НП}$ — параметр, характеризующий пуассоновский поток отказов устройства; $T_{устр}^{НП}$ — среднее значение времени, затрачиваемого на устранение отказа; μ — интенсивность восстановления готовности к работе устройства.

Графики зависимости от времени t вероятностей готовности к работе и вероятности отказа устройства представлены на рисунке 2. Решение построено по исходным данным, представленным в таблице 1.

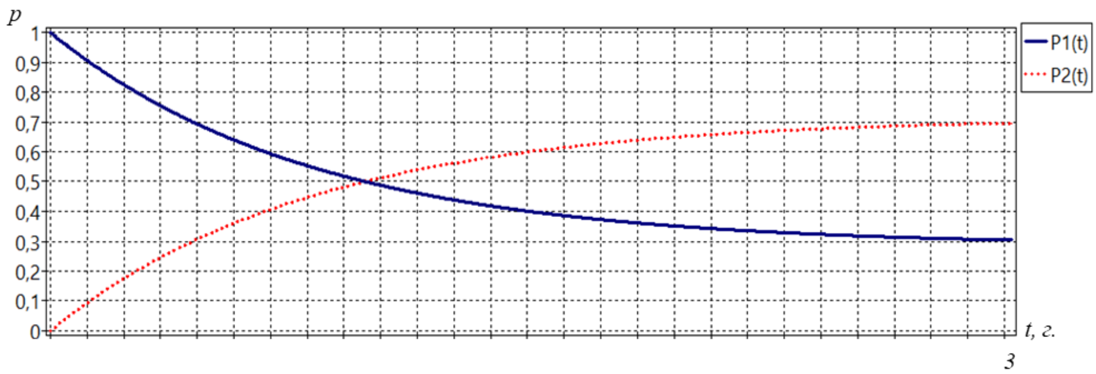

***Рисунок 2.** Графики P1(t), P2(t) (составлено автором)*

Таблица 1

Значения вероятности P_1 нахождения технического устройства в состоянии готовности к применению

$T_{устр}^{НП}$, ч	$\omega_{НП}$, $\frac{1}{ч}$		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
10	0,9901	0,9990	0,9999
25	0,9756	0,9975	0,9998
50	0,9524	0,9950	0,9995
100	0,9091	0,9901	0,9990

54SAVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

На рисунке 3 приведены графики зависимости величины вероятности работоспособного состояния устройства от параметра $\omega_{НП}$.

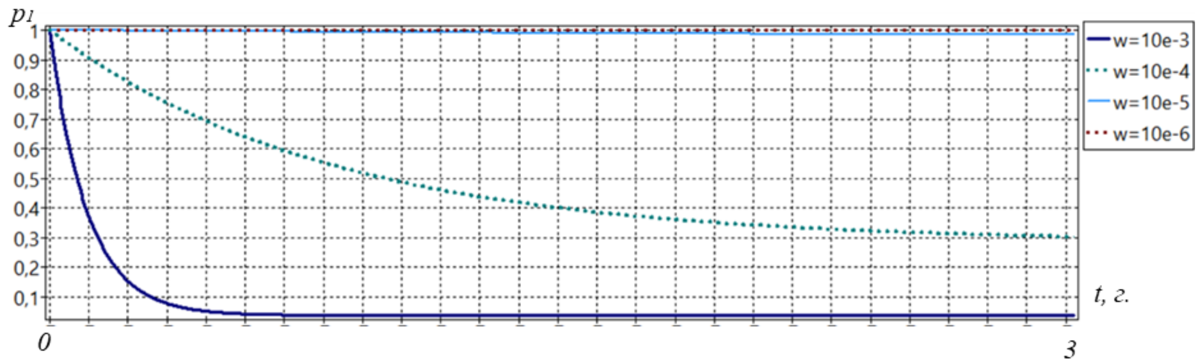

Рисунок 3. *Графики P1(t) при различных значениях параметра $\omega_{НП}$ (составлено автором)*

Представленные графики (рис. 3) и табличные данные показывают, что при $\omega_{НП} \le 10^{-5}\, 1/ч$ величина $\omega_{НП}$ оказывает незначительное влияние на вероятность состояния готовности *P1*, но с увеличением значения $\omega_{НП}$ (при $\omega_{НП} > 10^{-5}\, 1/ч$) ситуация изменяется: например, рост $T^{НП}_{устр}$ на 90 % при $\omega_{НП} = 10^{-4}\, 1/ч$ приводит к увеличению значения *P1* на *0,9 %,* а при $\omega_{НП} = 10^{-3}\, 1/ч$ — к увеличению на *8 %*.

Рассматривая величину $\dfrac{1}{T^{НП}_{устр}}$ в качестве управляющего параметра ($u = \dfrac{1}{T^{НП}_{устр}}$) с вводом обозначений: $x_1(t) = P_1(t),\ x_2(t) = P_2(t),\ t \in [0, T]$, приходим к постановке Парето-оптимальной задачи обеспечения максимального уровня надежности технического устройства в условиях наличия ограничения на величину финансовых ресурсов, используемых в процессе его обслуживания [8–10]. Задача оптимального управления надежностью технической системы примет следующий вид.

Требуется минимизировать функционал:

$$J(u) = -\int_0^T x_1(t)dt + M \max{}^2\{a - x_1{}^q, 0\} \to \min \tag{2}$$

при динамических ограничениях:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -a_{12}x_1(t) + x_2(t)u(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -x_2(t)u(t) + a_{12}(t)x_1(t), \end{aligned} \tag{3}$$

ограничениях на управление:

$$0 \le u(t) \le u_{\max}, \tag{4}$$

начальных условиях:

$$x_1(0) = 1,\ \ x_2(0) = 0,\ \ u(0) = 0. \tag{5}$$

Для задачи оптимального управления в приведенной постановке доступен широкий спектр аналитических и численных методов решения [11; 12]. Сформулируем необходимые условия оптимальности в задаче (2)–(5) в форме принципа максимума Понтрягина [13].

Функция Понтрягина для рассматриваемой задачи (2)–(5) примет вид:

$$\begin{gathered}H(\lambda_0,t,x_1,x_2,u,p_1(t),p_2(t))=\lambda_0 x_1+p_1(t)\left(-a_{12}x_1(t)+x_2(t)u(t)\right)+\\ +p_2(t)\left(-x_2(t)u(t)+a_{12}(t)x_1(t)\right)=\ \lambda_0 x_1-p_1(t)a_{12}x_1(t)+p_2(t)a_{12}(t)x_1(t)+\\ +\left(p_1(t)-p_2(t)\right)x_2(t)u(t).\end{gathered}\tag{6}$$

Введем функцию переключения следующего вида:

$$\varphi(t)=\left(p_1(t)-p_2(t)\right)x_2(t).$$

Преобразуя выражение (20), представим функцию Понтрягина в виде:

$$H(\lambda_0,t,x_1,x_2,u,p_1(t),p_2(t))=\lambda_0 x_1-p_1(t)a_{12}x_1(t)+p_2(t)a_{12}(t)x_1(t)+\varphi(t)u.$$

Согласно принципу максимума Понтрягина оптимальное управление удовлетворяет условию максимума [13]:

$$\begin{gathered}H\left(\lambda_0,t,\bar{x}_1(t),\bar{x}_2(t),\bar{u}(t),\bar{p}_1(t),\bar{p}_2(t)\right)=\\ =\max_{u\in U}H\left(\lambda_0,t,\bar{x}_1(t),\bar{x}_2(t),u,\bar{p}_1(t),\bar{p}_2(t)\right).\end{gathered}\tag{7}$$

Если $[\bar{x},\bar{u}]$ — оптимальный процесс в задаче (2)–(5), для оптимального управления выполняются соотношения:

$$\bar{u}(t)=\begin{cases}u_0,\text{если}\quad p_1(t)>p_2(t),\\ 0,\text{если}\quad p_1(t)<p_2(t),\\ \gamma\in[0,u_{\max}],\text{если}\quad p_1(t)=p_2(t),t\in[0,T],\end{cases}\tag{8}$$

для сопряженных функций $p_1(t),p_2(t)$ справедливы условия:

$$\begin{gathered}\dot{p}_1=-\frac{\partial H}{\partial x_1}=\lambda_0+p_1(t)a_{12}-p_2(t)a_{12}(t),\\ \dot{p}_2=-\frac{\partial H}{\partial x_2}=\left(p_2(t)-p_1(t)\right)u(t).\end{gathered}\tag{9}$$

При этом выполняются условия трансверсальности в конечной точке отрезка интегрирования:

$$p_1(T)=-2M\max\{a-x_1(T),0\},\ p_2(T)=0.\tag{10}$$

Построим дискретную задачу оптимального управления (ДЗОУ), аппроксимирующую исходную непрерывную задачу оптимального управления (2)–(5), применяя для аппроксимации производных схему Эйлера 1-го порядка точности, для замены целевого функционала правило левых прямоугольников с шагом дискретизации $\Delta t=\frac{T}{q}$ [14]. Здесь q — число точек равномерного разбиения отрезка [0, T].

Целевая функция в дискретной задаче оптимального управления примет вид:

$$I([x],[u])=-\sum_{i=0}^{q-1}x_1^{\,i}\Delta t+M\max{}^2\{a-x_1^{\,q},0\}\to\inf.\tag{11}$$

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Для пересчета x_1^{i+1}, x_2^{i+1} применяются соотношения:

$$\begin{gathered} x_1^{i+1} = x_1^i + \Delta t_i \left(-a_{12} x_1^i + x_2^i u^i \right), \\ x_2^{i+1} = x_2^i + \Delta t_i \left(-x_2^i u^i + a_{12}^i x_1^i \right). \end{gathered} \tag{12}$$

Используются начальные условия:

$$x_1^0 = 1, x_2^0 = 0, \tag{13}$$

заданы граничные условия для управления:

$$0 \le u^i \le u_{\max}, i = \overline{0, q-1}. \tag{14}$$

Введем функцию Лагранжа:

$$\begin{gathered} L(\lambda_0, t, x_1, x_2, p, u) = -\lambda_0 \sum_{i=0}^{q-1} x_1^i \Delta t_i + M \max{}^2\{a - x_1^q, 0\} + \\ + \sum_{i=0}^{q-1} p_1^{i+1} \left(x_1^{i+1} - x_1^i - \Delta t_i \left(-a_{12} x_1^i + x_2^i u^i \right) \right) + \sum_{i=0}^{q-1} p_2^{i+1} \left(x_2^{i+1} - x_2^i - \Delta t_i \left(-x_2^i u^i + a_{12}^i x_1^i \right) \right). \end{gathered} \tag{15}$$

В численном алгоритме используется метод быстрого автоматического дифференцирования [15], ограничения на управления учитываются с помощью проекции градиента [15–17]. Используя условия стационарности функции Лагранжа:

$$\begin{gathered} \frac{\partial L(\lambda_0, t, x_1, x_2, p, u)}{\partial x_1^i} = 0, \\ \frac{\partial L(\lambda_0, t, x_1, x_2, p, u)}{\partial x_2^i} = 0, \end{gathered} \tag{16}$$

вычисляем сопряженные переменные, используя соотношения:

$$\begin{gathered} \frac{\partial L(\lambda_0, t, x_1, x_2, p, u)}{\partial x_1^i} = p_1^i - p_1^{i+1}(1 - a_{12}\Delta t) - p_2^{i+1} a_{12} \Delta t - \Delta t = 0, \\ \frac{\partial L(\lambda_0, t, x_1, x_2, p, u)}{\partial x_2^i} = -p_1^{i+1} \Delta t u^i + p_2^i - p_2^{i+1}(1 - u^i \Delta t) = 0, \end{gathered} \tag{17}$$

следовательно,

$$\begin{gathered} p_1^i = p_1^{i+1}(1 - a_{12}\Delta t) + p_2^{i+1} a_{12} \Delta t + \Delta t, \\ p_2^i = p_2^{i+1}(1 - u^i \Delta t) + p_1^{i+1} u^i \Delta t, \\ p_1^q = 2M \max\{a - x_1^q, 0\}, \ p_2^q = 0. \end{gathered} \tag{18}$$

Вычисляем:

$$\frac{\partial L(\lambda_0, t, x_1, x_2, p, u)}{\partial u^i} = \left(p_2^{i+1} - p_1^{i+1} \right) x_2^i \Delta t. \tag{19}$$

Результаты

Численный алгоритм реализован в форме настольного приложения в IDE Lazarus с использованием языка программирования Free Pascal.

На рисунках 4–6 приведены графики оптимального управления и траекторий, полученных в ходе работы метода при следующих значениях параметров: q = 1 000, $T = 3$ *г.*, $\omega_{НП} = 10^{-4}$·1/ч, $x_1^0 = 1$, $x_2^0 = 0$, $u^{(0)} = 0$, $a = 0{,}9997$, $\alpha^{(0)} = 0{,}1$, $\varepsilon_I = 10^{-8}$, $\varepsilon_x = 10^{-8}$.

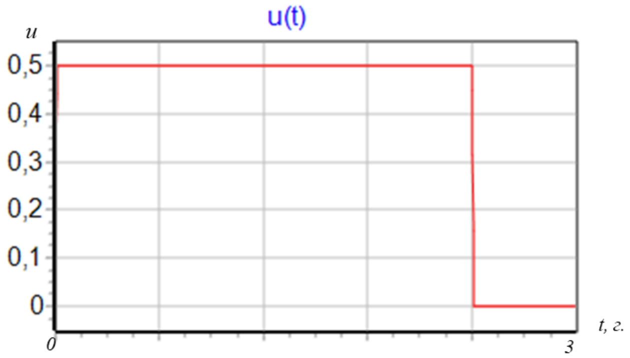

Рисунок 4. *График оптимального управления* $\overline{u}(t)$ *(составлено автором)*

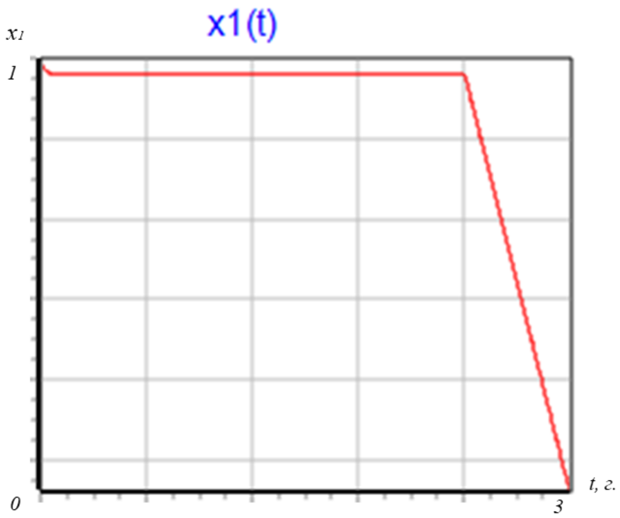

Рисунок 5. *График* $\overline{x_1}(t)$ *(составлено автором)*

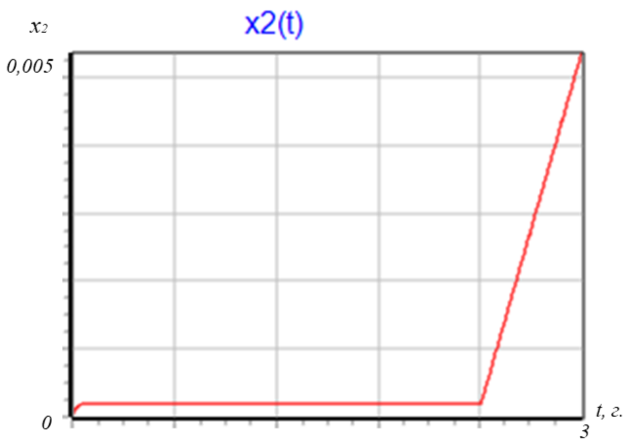

Рисунок 6. *График* $\overline{x_2}(t)$ *(составлено автором)*

Заключение

Применение предложенного алгоритма в автоматизированных системах поддержки принятия решений служит решению задачи повышения эксплуатационной надежности технических устройств, используемых на химически опасных объектах УИС, обеспечивая информационную поддержку при принятии управленческих решений в области обеспечения экологической и промышленной безопасности [18].

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитенко Ю.В. Управление экологическим риском химически опасных объектов: монография / Ю.В. Никитенко. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. 68 с.
2. Царькова Е.Г. К вопросу создания автоматизированных систем управления экологической безопасностью потенциально опасных объектов городского хозяйства // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 1.
3. Душкин А.В., Жукова М.А., Родин С.В., Сумин В.И. // Управление контролем целостности эталонной автоматизированной информационной системы вневедомственной охраны // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2013, № 1 С. 51–55.
4. Бояринцев А.В. Проблемы антитерроризма: угрозы и модели нарушителя / А.В. Бояринцев, А.Г. Зуев, А.В. Ничиков. — СПб.: ЗАО «НПП «ИСТА-Системс», 2008. — 220 с.
5. Сумин В.И. Разработка моделей и алгоритмов информационных структур и процессов объектов особой важности / В.И. Сумин, Д.Ю. Чураков, Е.Г. Царькова // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019, № 4. С. 30–39.
6. Novikov D.A. Mathematical model of information process of protection of the social sector / Novikov D.A., Tsarkova E.G., Dubrovin A.S., Soloviev A.S. // Journal of Physics: Conference Series, Voronezh, 18–20 декабря 2017 года. — Voronezh: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 012041.
7. Царькова Е.Г. Динамическая модель оптимального управления защитой ведомственных ситуационных центров от деструктивных воздействий // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 9. С. 25–27.
8. Dubrovin A.S. Analysis and visualization in graph database management systems / A.S. Dubrovin, O.V. Ogorodnikova, E.G. Tsarkova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series: Current Problems, Voronezh, 07–09 декабря 2020 года. Voronezh, 2021. P. 012059. DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012059.
9. Громов Ю.Ю., Ивановский М.А., Дидрих В.Е., Иванова О.Г., Мартемьянов Ю.Ф. Методы анализа информационных систем. М.: Изд-во МИНЦ «Нобелистика», 2012. — 220 с.
10. Громов Ю.Ю., Тютюник В.М. Меры количества и качества информации // Информационные системы и процессы. — Изд-во МИНЦ «Нобелистика». Тамбов. М.; СПб.; Баку; Вена; Гамбург, том 11, С. 4–8.

11. Кравченко А.С., Родин С.В., Смоленцева Т.Е. Аппаратно-программные средства и информационные процессы защиты систем предоставления пользователям доступа к программным ресурсам // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1.
12. Optimal management of website under adverse impacts conditions / D. Churakov, E. Tsarkova, T. Vorotnikova, A. Belyaev // Journal of Physics: Conference Series: Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, Voronezh, 11–13 ноября 2019 г. — Voronezh: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012113.
13. Царькова Е.Г. Динамическая модель управления надежностью автоматизированных систем специального назначения // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 7. С. 61–64.
14. Акулич О.Е. Численное решение задачи Коши методами Эйлера и Рунге-Кутта // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. 2011. Т. 59. С. 81–83.
15. Андреева Е.А., Мазурова И.С. Применение метода быстрого автоматического дифференцирования для оптимизации систем интегро-дифференциальных уравнений // Вестник Кемеровского государственного университета. 2014. № 4-2(60). С. 47–53.
16. Сумин В.И., Смоленцева Т.Е., Апсалямова Р.Д., Сахаров С.Л. Информационные процессы сложных систем // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Федеральная служба исполнения наказаний, ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», 2016. — С. 154–156.
17. Сумин В.И., Дураков С.Г., Чулюков В.А. Построение информационного процесса обучения на основе адаптивной модели: Вестник ВИ ФСИН России, № 2/2012. — С. 62–64.
18. Сумин В.И., Мельников А.В., Анциферова В.И., Сазонова С.А. Разработка логико-математических моделей принятия управленческих решений в сложных организационных системах специального назначения // Моделирование систем и процессов. 2023. Т. 16, № 1. С. 26–34.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Tsarkova Evgeniya Gennadievna
Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Moscow, Russia
Tver State University, Tver, Russia
E-mail: university69@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=252048

Mathematical model of reliability management of technical devices at chemically hazardous facilities of the Penal System

Abstract. In recent years, the increase in the capacity of technological equipment at chemically hazardous of the Penal System facilities, the complication of production systems, the processes of introducing new technical means are causing accidents at potentially dangerous industries and can lead to mass death, poisoning of people and animals, causing significant harm to health, severe environmental consequences, significant economic damage to urban economy. The aggravation of industrial safety problems at the Penal System facilities is associated with the growth of large-scale chemical production in close proximity to the place of residence of people, an increase in the content of hazardous substances in technological devices, including the growth of man-made threats, the implementation of which can lead to explosions, fires, accompanied by toxic emissions and other destructive phenomena. Ensuring a high level of reliability of technical devices, means of emergency protection, effective and timely organization of planned preventive measures related to the reliability management of technological equipment at chemically hazardous facilities is an extremely urgent task, on the successful solution of which depends the possibility of reducing the level of man-made threats and the likelihood of negative consequences associated with their implementation. Currently, there is a need to develop mathematical models for managing the reliability of technical systems during their operation. The paper considers the actual and practically significant task of reliability management of technical systems of potentially dangerous objects. A model of optimal control of the technical means of a chemically hazardous object is proposed, the necessary optimality conditions for solving the optimization problem under consideration are formulated. The algorithm of numerical solution of the formulated optimal control problem is developed, the results of testing of the implemented algorithm are presented.

The result of this study is a developed approach to determining the optimal strategy for managing the maintenance of technical devices in order to ensure industrial safety at chemically hazardous facilities of the Penal System. An algorithm for solving the problem by numerical methods is proposed, which ensures prompt obtaining of the optimal solution in a wide range of parameters.

Keywords: environmental safety; chemically hazardous object; industrial activity; labor adaptation; mathematical model; optimal control problem; necessary optimality conditions; rapid automatic differentiation method; Penal System