

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИКИ

М. А. Сивопляс

Филиал Военной академии ракетных войск стратегического назначения
имени Петра Великого (г. Серпухов), Серпухов, Московская обл., Россия
cozaks@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проведение технического обслуживания – один из важнейших этапов эксплуатации, который направлен на поддержание и при необходимости восстановление исправного состояния. Однако в практике обслуживания сложной и потенциально опасной техники известны случаи нерегламентированного воздействия персоналом на объект технического обслуживания, которые могут привести к проявлению опасных свойств. Таким образом, возникает необходимость разработки математического аппарата оценки вероятностей состояний безопасности технического обслуживания потенциально опасной сложной техники. *Материалы и методы.* Приводится обоснование применимости марковской модели для математического моделирования безопасности процесса технического обслуживания. *Результаты.* На основании разработанной модели составлена и решена аналитически система дифференциальных уравнений Колмогорова расчета вероятностей безопасности процесса технического обслуживания. *Выводы.* Таким образом, аналитические зависимости вероятностей безопасности процесса технического обслуживания позволяют оценить и спрогнозировать совершение нерегламентированного воздействия на потенциально опасную сложную технику в процессе технического обслуживания.

Ключевые слова: безопасность технического обслуживания, марковский процесс, система уравнений Колмогорова, интенсивность совершения ошибки

Для цитирования: Сивопляс М. А. Марковская модель безопасности технического обслуживания сложной техники // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 49–53. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-6

THE MARKOV MODEL OF SAFETY OF MAINTENANCE OF COMPLEX EQUIPMENT

M.A. Sivoplyas

Branch Military Academy of Strategic Missile Forces
named after Peter the Great (Serpuhkov), Serpuhkov, Moscow region, Russia
cozaks@bk.ru

Abstract. *Background.* Maintenance is one of the most important stages of operation, which is aimed at maintaining and, if necessary, restoring serviceable condition. However, in the practice of servicing complex and potentially dangerous equipment, there are cases of unregulated exposure by personnel to the maintenance facility, which can lead to the manifestation of dangerous properties. Thus, there is a need to develop a mathematical apparatus for assessing the probabilities of safety conditions of maintenance of potentially dangerous complex equipment. *Materials and methods.* The presented article provides a justification for the applicability of the Markov model for mathematical modeling of the safety of the maintenance process. *Results.* Based on the developed model, a system of Kolmogorov differential equations for calculating the probabilities of the safety of the maintenance process has been compiled and solved analytically. *Conclusions.* Thus, the analytical dependences of the probabilities of the safety of the maintenance process make it possible to assess and predict the commission of an unregulated impact on potentially dangerous complex equipment during maintenance.

Keywords: maintenance safety, Markov process, Kolmogorov equation system, error intensity

For citation: Sivoplyas M.A. The Markov model of safety of maintenance of complex equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):49–53. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-6

Актуальность и цели

Техническое обслуживание (ТО) является неотъемлемым этапом эксплуатации сложной техники. Оно проводится квалифицированным персоналом в определенном объеме, установленном в

документации на объект, и обычно включает контроль технического состояния объекта ТО, устранение выявленных при контроле технического состояния отказов, мероприятия, направленные на предупреждение возможных отказов, работы, обеспечивающие готовность объекта ТО к использованию по назначению, оформление документов. Во время выполнения работ персонал взаимодействует с функциональными элементами объекта ТО, поэтому всякое действие, непредусмотренное документацией на проведение ТО, потенциально может привести к опасному состоянию техники и характеризуется вероятностью совершения ошибочного действия персоналом.

Материалы и методы

Состояние безопасности процесса ТО зависит от безопасности объекта [1]. Так, безопасностью техники является состояние специально придаваемой ей на этапе создания и разработки, которое в сочетании с комплексом организационно-технических мер на всех стадиях жизненного цикла обеспечивает исключение или снижение до допустимого уровня возможности проявления опасности.

Как правило, действиями персонала при работе со сложной техникой руководит более подготовленный и опытный работник. Основной задачей руководителя является проведение работ в строгом соответствии с методиками, описанными в документации, а также своевременное принятие мер по предотвращению ошибочных действий персонала. Действие персонала во время ТО сложной техники характеризуется некоторым множеством параметров, оценив которые, руководитель прогнозирует дальнейшее действие и делает вывод о его правильности [2]. Таким образом, руководитель выступает в роли контролирующего звена в системе технического обслуживания, которому свойственны ошибки первого и второго рода. Именно ошибка второго рода способствует совершению ошибочного действия персоналом во время выполнения операции.

С целью прогнозирования и оценки безопасности проведения ТО сложной техники в описанных выше условиях разработана модель процесса ТО. Основными допущениями в моделировании процесса являются: 1) вероятность совершения ошибочного действия персоналом > 0 , 2) всякое ошибочное действие персонала приводит к опасному состоянию процесса ТО, 3) потоки событий процесса ТО являются стационарными, т.е. их характеристики не зависят от времени.

В процессе ТО сложной техники выделены состояния безопасности.

- Безопасное состояние характеризуется регламентированным проведением ТО. Во время проведения ТО персонал выполняет действия согласно документации ТО, при этом не исключается ошибочное действие.

- Потенциально опасное состояние, при котором ошибочное действие не допущено, однако есть предпосылки к его совершению, которые могут проявляться в различных формах. К примеру, психофизическое состояние персонала соответствует неуверенным действиям либо знания, умения и навыки персонала не позволяют персоналу уверенно правильно выполнить действие и т.д. Если руководитель ТО делает верный вывод о потенциально опасном состоянии ТО, тогда он предпринимает корректирующие действия, которые переводят систему в безопасное состояние.

- Если руководитель совершает ошибку второго рода и делает неверное заключение о состоянии безопасности процесса ТО, тогда после совершения ошибочного действия система переходит в опасное состояние. Опасное состояние характеризуется негативными последствиями совершенного ошибочного действия персонала во время ТО. Описанные состояния ТО и события перехода между состояниями изображены графом состояний на рис. 1.

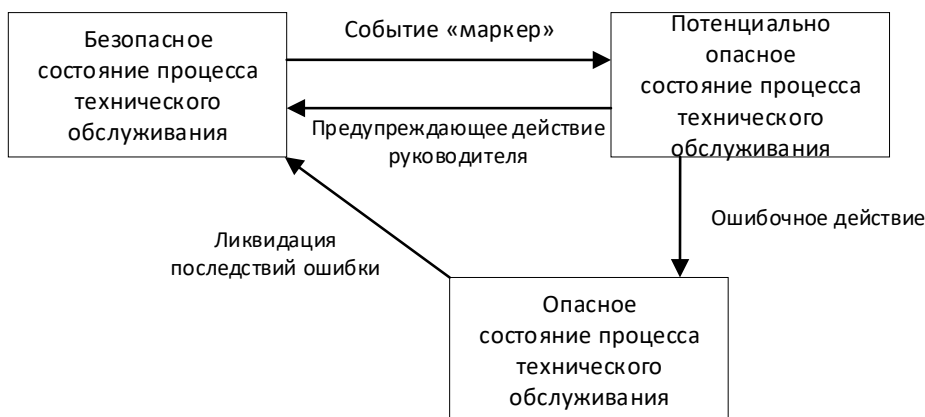


Рис. 1. Граф состояний процесса технического обслуживания

Описанный процесс проведения ТО с учетом введенных допущений является марковским. Процесс ТО является случайным, и для любого момента времени вероятностные характеристики процесса технического обслуживания в будущем зависят только от его состояния в данный момент времени и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние.

Каждое состояние процесса ТО характеризуется вероятностью, а в совокупности они образуют полную группу несовместных состояний:

$$P_{\text{бс}} + P_{\text{пос}} + P_{\text{о}} = 1,$$

где $P_{\text{бс}}$ – вероятность безопасного состояния процесса ТО; $P_{\text{пос}}$ – потенциально опасное состояние; $P_{\text{о}}$ – опасное состояние.

Потоки событий процесса ТО изменяют состояние безопасности и являются простейшими с учетом допущения (обладают свойствами стационарности, если его характеристики не зависят от времени; ординарности, если события появляются по одиночке; не имеют последствий, если для любых двух непересекающихся участков времени число событий, попадающих на один из них, не зависит от того, сколько событий попало на другой) [3].

Важной характеристикой потока событий является интенсивность, значение которых обозначены как α_1 – интенсивность событий «маркер», α_2 – интенсивность событий совершения ошибочного действия, μ_1 – интенсивность событий корректировки руководителем действий персонала, μ_2 – интенсивность событий последствий ошибочных действий персонала.

Интенсивность события «маркер», а также события совершения ошибочного действия зависят от качеств персонала, который выполняет действия. К таким качествам относятся знания, умения и навыки выполнения работ, психологическое и физиологическое состояния человека и др. Интенсивность события корректировки руководителем действий персонала характеризует руководителя, участвующего в ТО сложной техники, его квалификации и опыта руководства ТО и выполнения действий, также психологического, физиологического состояния и др.

Для описанного процесса ТО составлены уравнения Колмогорова, которые позволяют найти функции вероятностей состояний процесса ТО от времени:

$$\begin{cases} \frac{dP_{\text{бс}}}{dt} = P_{\text{пос}}\mu_1 + P_{\text{о}}\mu_2 - P_{\text{бс}}\alpha_1, \\ \frac{dP_{\text{пос}}}{dt} = P_{\text{бс}}\alpha_1 - P_{\text{пос}}(\mu_1 + \alpha_2), \\ \frac{dP_{\text{о}}}{dt} = P_{\text{пос}}\alpha_2 - P_{\text{о}}\mu_2. \end{cases} \quad (1)$$

В начальный момент времени ($t = 0$) ТО имеет безопасное состояние, поскольку на обслуживаемую технику не было оказано нерегламентированного воздействия. Следовательно, на основе системы уравнений (1) формулируется задача Коши, исходные данные которой – $P_{\text{бс}}(0) = 1$, $P_{\text{пос}}(0) = P_{\text{о}}(0) = 0$.

Получено аналитическое решение, представленное ниже. Значение параметра D , который рассчитывается по формуле (2), влияет на зависимость вероятности состояний безопасности ТО сложной техники от времени:

$$D = (\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)^2 + 4(\mu_1\alpha_1 - \mu_2(\mu_1 + \alpha_2) - \mu_2\alpha_1 - \alpha_1(\mu_1 + \alpha_2)). \quad (2)$$

Если $D > 0$, то

$$\begin{aligned} P_{\text{бс}}(t) &= \frac{1}{\alpha_1} \left[C_1(k1 + \mu_1 + \alpha_2)e^{tk1} + C_2(k2 + \mu_1 + \alpha_2)e^{tk2} + A(\mu_1 + \alpha_2) \right], \\ P_{\text{пос}}(t) &= C_1e^{tk1} + C_2e^{tk2} + A, \\ P_{\text{о}}(t) &= 1 - \frac{k1 + \mu_1 + \alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_1} C_1e^{tk1} - \frac{k2 + \mu_1 + \alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_1} C_2e^{tk2} - \frac{\mu_1 + \alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_1} A, \end{aligned}$$

где

$$C_2 = \frac{\alpha_1 + Ak_1 + A - A(\mu_1 + \alpha_2)}{(k_2 - k_1)},$$

$$C_1 = -\frac{\alpha_1 + Ak_1 + A - A(\mu_1 + \alpha_2)}{(k_2 - k_1)} - A,$$

$$k_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)^2 - 4(\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2)} + \frac{1}{2}(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1),$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \sqrt{(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)^2 - 4(\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2)} - \frac{1}{2}(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1),$$

$$A = \frac{\mu_2\alpha_1}{\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2}.$$

Если $D = 0$, то

$$P_{\text{noc}}(t) = e^{-0,5t(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)}(C_1 + C_2t) + A,$$

$$P_{\text{6c}}(t) = \frac{1}{\alpha_1} (e^{-0,5t(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)}(C_2 - 0,5(\mu_2 + \alpha_1)(C_1 + C_2t) + 0,5(\mu_1 + \alpha_2)(C_1 + C_2t)) + (\mu_1 + \alpha_2)A),$$

$$P_o(t) = 1 - P_{\text{noc}}(t) - P_{\text{6c}}(t),$$

где

$$A = \frac{\mu_2\alpha_1}{\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2},$$

$$C_2 = \alpha_1 - 0,5A(\mu_2 + \alpha_1) + A(\mu_1 + \alpha_2)(\alpha_1 - 0,5),$$

$$C_1 = -A.$$

Если $D < 0$, то

$$P_{\text{noc}}(t) = e^{-0,5tq} (C_1 \cos(t\sqrt{|D|}) + C_2 \sin(t\sqrt{|D|})) + A,$$

$$P_{\text{6c}}(t) = \frac{e^{-0,5tq}}{\alpha_1} [(\sin(t\sqrt{|D|}))(-C_1\sqrt{|D|} - 0,5C_2q\sqrt{|D|} + C_2(\mu_1 + \alpha_2)) + \cos(t\sqrt{|D|})(C_2\sqrt{|D|} - 0,5C_1q\sqrt{|D|} + C_1(\mu_1 + \alpha_2))] + A(\mu_1 + \alpha_2),$$

$$P_o(t) = 1 - P_{\text{noc}}(t) - P_{\text{6c}}(t),$$

$$A = \frac{\mu_2\alpha_1}{\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2},$$

$$C_1 = -A,$$

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{|D|}} (\alpha_1 + A(\mu_1 + \alpha_2) - \alpha_1 A(\mu_1 + \alpha_2) - 0,5Aq\sqrt{|D|}),$$

$$q = \mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1.$$

Результаты

Полученные зависимости позволяют оценить вероятности состояний безопасности ТО сложной техники. Исходными данными являются значения интенсивностей событий во время ТО: α_1 – интен-

сивность событий «маркер»; α_2 – интенсивность событий совершения ошибочного действия; μ_1 – интенсивность событий корректировки руководителем действий персонала; μ_2 – интенсивность событий последствий ошибочных действий персонала.

При этом стоит учесть, что интенсивности потока событий могут принимать только неотрицательные значения: $\mu_1 \geq 0$, $\mu_2 \geq 0$, $\alpha_1 \geq 0$, $\alpha_2 \geq 0$.

Замечаний руководителя всегда объективно больше, чем неправильно выполненных действий и операций. На практике чаще встречаются работы, в которых руководитель делал замечания, при этом негативных последствий ошибки не допущено. Следовательно, $\mu_1 > \alpha_2$.

Заключение

Таким образом, получена марковская модель безопасности ТО сложной техники, с помощью которой возможно провести анализ безопасности ТО на основании интенсивностей совершенных событий. Модель позволит учесть зависимость безопасности ТО от индивидуальных качеств персонала, участвующего в работах. Дальнейшее развитие модели подразумевает снятие ограничения о стационарности потоков событий процесса ТО и интеграция с моделями действий персонала и контролирующих лиц во время ТО.

Список литературы

1. Александровская Л. Н., Аронов И. З., Елизоров А. И. [и др.]. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем : учебник / под ред. В. П. Соколова. М. : Логос, 2001. 232 с.
2. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах : пер. с англ. / под ред. И. А. Ушакова. М. : Сов. радио, 1974. 272 с.
3. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. 2-е изд., стер. М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 208 с.

References

1. Aleksandrovskaya L.N., Aronov I.Z., Elizorov A.I. et al. *Statisticheskie metody analiza bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem: uchebnik* = *Statistical methods of security analysis of complex technical systems : textbook*. Moscow: Logos, 2001:232. (In Russ.)
2. Akoff R., Emeri F. *O tselestremennykh sistemakh: per. s angl.* = *About purposeful systems : trans. from English*. Moscow: Sov. radio, 1974:272. (In Russ.)
3. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya. 2-e izd., ster.* = *Operations research: tasks, principles, methodology. 2nd ed., ster.* Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988:208. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Андреевич Сивопляс

адъюнкт,
 Филиал Военной академии ракетных войск
 стратегического назначения
 имени Петра Великого (г. Серпухов)
 (Россия, Московская обл.,
 г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
 E-mail: cozaks@bk.ru

Maksim A. Sivoplyas

Adjunct,
 Branch Military Academy of Strategic Missile Forces
 named after Peter the Great (Serpukhov)
 (17 Brigadnaya street, Serpukhov,
 Moscow Region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
 The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 17.01.2022

Принята к публикации/Accepted 18.02.2022