

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д. В. Варнаков¹, А. Н. Юденичев², А. В. Бугаев³

¹ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, Российская Федерация

²ФАН «25 Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации», г. Москва, Российская Федерация

³Министерство просвещения Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы оценки эффективности функционирования сложных технических систем. Предложен метод оценки сложных технических систем с учетом особенностей связей элементов, входящих в нее, и характеризующихся не только вероятностными параметрами, но и с точки зрения эффективности их функционирования. Предложенные теоретические основы метода оценки эффективности функционирования сложных технических систем, предполагающие использование математического аппарата, характеризующего интенсивность изменения параметров технической системы в заданных границах, позволяют прогнозировать оптимальные временные интервалы операций технического обслуживания и ремонта. Сложная техническая система рассматривается с точки зрения параметров эффекта и затрат на его достижения, выраженных параметрической функцией. Повышение эффективности технического обслуживания и ремонта путем моделирования и оптимизации ремонтных воздействий предполагает внедрение новых средств оперативной и непрерывной диагностики параметров. Внедрение метода оценки эффективности функционирования сложных технических систем позволяет осуществлять прогнозирование параметрической надежности, выявления потенциальных отказов и их предупреждение. *Ключевые слова:* сложная техническая система, надежность, эффективность, технический сервис, моделирование, параметрическая надежность, оптимизация.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

D. V. Varnakov³, A. N. Yudenichev^b, A. V. Bugaev^c

^a*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation*

^b*25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation*

^c*The Ministry of Education of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation Abstract. The article deals with the issues of evaluating the effectiveness of the functioning of complex technical systems. A method for evaluating complex technical systems is proposed, taking into account the peculiarities of the connections of the elements included in it, and characterized not only by probabilistic parameters, but also in terms of the effectiveness of their functioning. The proposed theoretical foundations of the method for evaluating the effectiveness of the functioning of complex technical systems, which involve the use of a mathematical apparatus that characterizes the intensity of changes in the parameters of a technical system within given boundaries, make it possible to predict the optimal time intervals for maintenance and repair operations. A complex technical system is considered from the point of view of the parameters of the effect and the cost of achieving it, expressed by a parametric function. Improving the efficiency of maintenance and repair by modeling and optimizing repair impacts involves the introduction of new tools for operational and continuous diagnostics of parameters. The introduction of a method for evaluating the effectiveness of the functioning of complex technical systems makes it possible to predict parametric reliability, identify potential failures and prevent them.*

Keywords: complex technical system, reliability, efficiency, technical service, modeling, parametric reliability, optimization.

Сложные технические системы характеризуются как числом элементов, так и особенностью их связей и при их оценке могут характеризоваться не только вероятностными параметрами, но и с точки зрения эффективности их функционирования. Такая постановка приводит к необходимости по-новому оценивать многие, и, в частности, эксплуатационные и оперативные характеристики сложных систем, в том числе работу параметров системы в заданных границах.

Основная идея рассматриваемого метода оценки эффективности заключается в том, что сложная техническая система должна рассматриваться с точки зрения параметров эффекта и затрат на его достижения, выраженных параметрической функцией. Интенсивность приближения параметров, характеризующих эффективность функционирования сложной технической системы к предельно допустимым границам, может быть использована при

планировании и корректировке сроков ее технического обслуживания.

Стратегия технического сервиса строится на основании следующей информации:

- объективных данных о машине (характеристик безотказности и ремонтпригодности);
- специфических особенностей машины (структурной системы, характеристик индикации отказов, наличия встроенного контроля работоспособности);
- данных об условиях эксплуатации.

Внедрение автоматизированных систем технического диагностирования включает в себя решение ряда задач:

- выбор оптимальных сроков проведения плановых восстановительных работ при полной информации о надежности технической системы;
- определение оптимальных сроков проведения плановых восстановительных работ при ограниченной информации о надежности и др.

Нахождение оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта позволяет добиваться наилучших результатов за счет реорганизации правил эксплуатации при минимальных затратах, при этом необходимо определить критерий оптимальности по некоторому показателю, характеризующему качество функционирования.

В качестве математической модели, описывающей эволюцию технической системы во времени, могут быть использованы процессы $\lambda(t)$, принадлежащий к одному из следующих классов:

- регенерирующие случайные процессы;
- марковские случайные процессы;
- полумарковские случайные процессы.

В задачах технического сервиса рассматриваются следующие показатели машин при длительной эксплуатации:

- коэффициент готовности Kz' ;
- вероятность выполнения задачи (коэффициент оперативной готовности) $R(z)$;
- средняя прибыль за единицу календарного времени S ;

■ средние затраты за единицу времени исправного функционирования C .

Следует учитывать, что зачастую характеристики надежности точно не определены, а известно лишь, что функции распределения принадлежат некоторому классу. Возможны следующие ситуации:

■ известны значения $y = (0, j, t_n)$ функции распределения времени безотказной работы $F(y)$ в отдельных точках $y = (y_0 = 0, y_i, y_{..})$, т.е. $F(y_i) = \dots$, $i = 0, n$ (класс таких функций будем обозначать через $O(n, y, y-)$);

■ известны моменты распределения $F(y) = \int_0^y f(x) dx$, $k = 1, 2, \dots, m$ (класс таких функций обозначается через $O(m)$);

В таких ситуациях может быть использован метод минимакса, при котором сначала среди всех функций распределения, которые характеризуют функционирование системы и информация о которых ограничивается их принадлежностью определенному заданному классу, находятся наихудшие (в смысле данного показателя качества), а затем при этих условиях определяется оптимальное управление.

Рассматривая немарковские управляемые случайные процессы в задачах оптимизации технического обслуживания поведение системы во времени можно выразить как векторный случайный процесс $X(t)$, составляющие которого могут меняться непрерывно либо скачкообразно. В таком случае состояние процесса в фиксированный момент времени t характеризует факт исправности (или неисправности) системы. Чаще всего процесс $X(t)$ наблюдается дискретно с интервалом Δt в моменты $t_k = k \Delta t$, $k = 0, 1, 2, \dots$, т.е. наблюдается последовательность случайных векторов X_0, X_1, \dots, X_k . Значит, в каждый момент t_k становится известной вся прошлая траектория случайного процесса $X(t)$: $(x_0, x_1, \dots, x_k) = X_k$.

Тогда в процессе эксплуатации сложной технической системы в момент t_k по наблюдаемой траектории X_k можно принять только два решения:

■ либо не вмешиваться в работу системы и продолжить наблюдение за процессом $X(t)$.

■ либо прекратить работу системы и путем замен и регулировок вернуть систему в начальное состояние.

В момент отказа системы, т.е. при $X_0 \in X_+, \dots, X_{\kappa-1} \in X_+, X_{\kappa} \in X_-$ принимается второе решение (здесь x_+ - пространство исправных состояний системы, x_- - пространство ее неисправных состояний $X = X_+ \cup X_-$, где X - все пространство состояний системы). Если ввести функцию эксплуатационных потерь системы как C_1^* - средние потери в случае, когда в момент остановки системы она исправна, а C_2^* - средние потери в случае, когда в момент остановки система неисправна (отказ), то в момент остановки системы ($t_k = \kappa At$) функция средних удельных потерь имеет вид:

$$y(\kappa) = \begin{cases} \frac{C_1}{t_k} & \text{,если система исправна;} \\ \frac{C_2}{t_k} & \text{.если система неисправна.} \end{cases} \quad (1)$$

Правилом остановки системы при наблюдении за процессом $X(t)$ (далее просто правилом остановки) назовем случайную величину v со значениями $1, 2, \dots, \kappa, \dots$ (момент остановки определяется поведением процесса $X(t)$, поэтому он случаен во времени). Считаем, что решение об остановке в момент t_k зависит только от траектории процесса X_{κ} до момента t_k .

Для правила остановки v - случайной величины с распределением $P_j v - kJ, \kappa = 1, 2, \dots$ средние потери:

$$Y(v) = S^P (v = \kappa) \sum_{\kappa=1} Y_{\kappa} \quad (2)$$

При решении задач эксплуатации правило v^* оптимально, если $y(v^*) = \min y(v)$. Под величинами C_1 и C_2 могут пониматься соответственно средние времена регулировок исправной I_1 и неисправной I_2 систем.

Таким образом, повышение эффективности технического сервиса машин путем моделирования и оптимизации ремонтных воздействий предполагает внедрение новых средств оперативной

и непрерывной диагностики параметров. Внедрение рассмотренных методов дает возможность прогнозирования параметрической надежности, выявления потенциальных отказов и их предупреждения, что позволяет реализовать техническое обслуживание по фактическому состоянию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Едидманидзе, О. Н. О перспективах развития автомобильного транспорта в агропромышленном комплексе / О. Н. Дидманидзе, А. М. Карев, Г. Е. Митягин // Международный научный журнал. - 2016. - № 1. - С. 53-65.

2. Цифровые технологии в техническом сервисе АПК / М. Н. Ерохин, Д. В. Варнаков, В. В. Варнаков, М. Ю. Карелина // В сб.: Чтения академика В. Н. Болтинского : семинар. - 2021. - С. 34-43.

3. Патент № 2743092 С9 Российская Федерация, МПК G01M 15/00, G01M 15/05. Способ и система контроля параметров технического состояния двигателя внутреннего сгорания : № 2019118838 : заявл. 17.06.2019 : опубл. 22.02.2022 / Д. В. Варнаков, В. В. Варнаков, Д. Н. Яшин [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет».

4. Варнаков, Д. В. Применение контрольных карт Шухарта в системах измерения параметров / Д. В. Варнаков, М. А. Афонин // Аграрный научный журнал. - Саратов: СГАУ, 2018. - №2. - С. 54-58.

5. Варнаков, Д. В. Использование диагностических параметров при оценке и прогнозировании параметрической надежности двигателей автотранспортных средств : монография / Д. В. Варнаков. - Ульяновск: УлГУ, 2013. - 124 с. - ISBN 978-5-88866-486-5.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614322 Российская Федерация. Оценка эффективности управления процессами технического обслуживания и ремонта машин : № 2018611398 : заявл. 13.02.2018 : опубл. 04.04.2018 / Д. В. Варнаков, М. А. Афонин, М. Е. Дежаткин [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет».

7. Трухачев, В. И. Будущее тракторостроения в России / В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, Н. Н. Пуляев // В сб.: Подъемнотранспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы : сборник статей 26-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. - 2022. - С. 15-21.

8. Варнаков, Д. В. Применение методики прогнозирования надежности двигателей военной автомобильной техники в нормальном и специальном эксплуатационных режимах / Д. В. Варнаков, М. А. Афонин, Д. В. Пикулин // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. - 2017. - № 2 (42). - С. 85-90.

9. Афонин, М. А. Применение CALS-технологии информационной поддержки на стадии эксплуатации автотранспортных средств как способ обеспечения их надежности / М. А. Афонин, А. Е. Клименко, Д. В. Варнаков // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. - 2018. - №2 (46). - С. 41-50.

10. Дидманидзе, О. Н. Тенденции развития цифровых технологий диагностирования технического состояния тракторов / О. Н. Дидманидзе, А. С. Дорохов, Ю. В. Катаев // Техника и оборудование для села. - 2020. - № 11 (281).-С. 39-43.

Об авторах:

Варнаков Дмитрий Валерьевич, профессор кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (432017, Российская Федерация, Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), доктор технических наук, доцент, vamdm@mail.ru.

Юденичей Андрей Николаевич, младший научный сотрудник ФАУ «25 Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации» (121467, Российская Федерация, Москва, ул. Молодогвардейская, д. 10).

Бугаев Александр Вячеславович, первый заместитель Министра просвещения Российской Федерации (127006, Российская Федерация, Москва, ул. Каретный Ряд, д. 2), кандидат технических наук.

About the authors:

Dmitrii V. Varnakov, professor of the Department of Technosphere Security, Ulyanovsk State University (432017, Russian Federation, Ulyanovsk, Lva Tolstogo str., 42), D.Sc. (Engineering), associate professor, vamdm@mail.ru.

Andrey N. Yudenichev, Junior Researcher at the FAI «25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of the Russian Federation» (121467, Russian Federation, Moscow, Molodogvardeyskaya str., 10).

Aleksandr V. Bugaev, First Deputy Minister of Education of the Russian Federation (127006, Russian Federation, Moscow, Karetny Ryad str., 2), Cand.Sc. (Engineering).