

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ БЕССТУПЕНЧАТОГО МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА СО СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

*О.О. Павловская, Р.А. Закиров, Ю.М. Землянский,
С.В. Кондаков, И.А. Подживотова*

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Авторами статьи определен уровень надежности бесступенчатого дифференциально-го механизма поворота со следящей системой управления (БДМПсССУ), достигнутый на стадии его проектирования и изготовления. По результатам анализа структуры данного механизма определено понятие отказа БДМПсССУ. Математическая модель надежности БДМПсССУ как восстанавливаемого изделия получена по графу состояний с учетом ряда допущений, основным из которых является допущение о стационарности, отсутствии последствия и ординарности процесса функционирования изделия. При определении параметров математической модели БДМПсССУ использованы статистические данные об интенсивностях отказов и наработок на отказ составных частей изделия, полученные в процессе испытаний приборов-аналогов. Решением системы дифференциальных уравнений Колмогорова при заданных начальных условиях определена функция готовности изделия. Функция готовности рассчитана с учетом нагрузок, которые возникают при эксплуатации БДМПсССУ в составе подвижного объекта, введением поправочного коэффициента для интенсивностей отказов элементов изделия. С использованием функции готовности определены величина наработки на отказ (показатель безотказности) и величина срока службы (показатель долговечности). Оба показателя надежности удовлетворяют требованиям задания. Особенность приведенных расчетов надежности БДМПсССУ в том, что в них сделан акцент на конструктивные, а не на производственные и эксплуатационные отказы. Это позволило убедиться в грамотности принятых на этапе проектирования БДМПсССУ решений, в том числе решения об унификации и стандартизации деталей, узлов, решения об использовании высоконадежных элементов и узлов. Это оправдано не только повышением надежности изделия, но и сокращением его стоимости.

Ключевые слова: надежность, наработка на отказ, срок службы до списания, бесступенчатый механизм поворота, следящая система управления.

В процессе разработки конструкции нового изделия для установления уровня его надежности и с целью получения информации об отказах, возникающих в изделии вследствие его конструктивных несовершенств, традиционно проводятся исследовательские испытания [1]. Получив информацию о фактических значениях показателей надежности изделия, разработчик либо убеждается в адекватности выбранных конструкторских решений, либо выявляет «слабые места» изделия и получает возможность их устранить.

Подготовка к проведению исследовательских испытаний среди прочих требует решения вопроса о требуемом объеме испытаний (числе испытываемых образцов, суммарной продолжительности испытаний в единицах наработки и числе серий испытаний) [2]. Определение объема испытаний – работа, связывающая надежность техники и экономику. С одной стороны, для повышения достоверности результатов испытаний нового изделия объем испытаний следует увеличить. С другой стороны, каждое проведенное испытание – это время и деньги, поэтому объем испытаний должен быть минимальным, поэтому часто на этапе проектирования ограничиваются исследовательскими испытаниями единственного опытного образца. Однако оценки показателей надежности носят вероятностный характер и при испытаниях опытного образца достоверность полученных оценок показателей надежности неприемлемо низкая.

В связи с этим акцент в оценке показателей надежности проектируемых изделий смещается от **экспериментальных методов** (методов, основанных на статистической обработке данных, получаемых при испытаниях или эксплуатации изделия) к **расчетным методам** [3–13]. Ведь дей-

Расчет и конструирование

ствующие нормативные документы [2, 14] предусматривают как экспериментальные, так и расчетные методы оценки показателей надежности.

Определение уровня надежности бесступенчатого дифференциального механизма поворота со следящей системой управления (БДМПССУ), достигнутого на стадиях проектирования и изготовления, выполнено расчетными методами по математической модели надежности (получена по результатам анализа структуры данного механизма и условий его работы) с использованием статистических данных интенсивностей отказов или наработок на отказ составных частей изделия, полученных в процессе испытаний приборов-аналогов.

Обычно для конкретных изделий устанавливают не более двух показателей надежности, на которые ориентированы проектанты при создании техники, в данном случае:

- 1) наработка на отказ за 2000 часов работы машины должна быть не менее 1500 моточасов;
- 2) срок службы до списания – не менее 5 лет.

Исходными данными при расчетах надежности любой восстанавливаемой системы являются:

- 1) принципиальная схема системы с указанием элементов, входящих в систему;
- 2) значения интенсивностей отказов и интенсивностей восстановления всех элементов системы при номинальных и фактических режимах ее работы.

В принципиальной схеме БДМПССУД выделены 2 группы элементов [15]:

– первичные элементы: передача главная, ряд планетарный суммирующий, левая и правая бортовые передачи;

– элементы, состоящие из первичных:

- система смазки (состоит из фильтра, гидронасоса и рукава высокого давления (РВД));
- тормозная система следящей системы управления (состоит из гидропневмоаккумулятора (ГПА), 2 блоков управления тормозами (ручной тормоз и ножной тормоз), клапана зарядки ГПА и клапана давления, гидронасоса и РВД);
- гидросистема управления поворотом следящей системы управления (включает гидромотор, гидронасос, гидрораспределитель, электрогидрораспределитель, РВД и блок питания).

Следует отметить, что отказы входящего в состав следящей системы управления (ССУ) электрооборудования (джойстик, микропроцессор, датчики, электрорадиоэлементы) – относительно редкие события по сравнению с отказами элементов гидравлической системы, гидростатического привода механизма поворота, механических элементов (редукторов), поэтому в расчетах надежности БДМПССУ электрооборудование не рассматривается.

Интенсивности отказов элементов механизма постоянны и равны λ_i , $i = 1, 2, \dots, n$, где n – число элементов в механизме (см. таблицу [16]).

Интенсивность восстановления i -го элемента БДМПССУ определяется по выражению

$$\mu_i = 1/t_{ei},$$

где t_{ei} – среднее время восстановления i -го элемента изделия, определяемое группой сложности [17]: отказы элементов следящей системы управления (элементы тормозной системы и гидросистемы управления поворотом) относятся к отказам I группы с продолжительностью устранения 2 ч ($\mu_I = 0,5 \text{ ч}^{-1}$); отказы элементов БДМП относятся к отказам II группы сложности с продолжительностью устранения 8 ч ($\mu_{II} = 0,125 \text{ ч}^{-1}$).

Проведем расчет надежности с учетом следующих допущений:

1. Отказом разрабатываемого БДМПССУ считается: потеря герметичности элементов гидравлической системы гидростатического привода механизма поворота; подтекание масла через соединения и уплотнения с каплеобразованием; контактные разрушения зубьев; поломка зубьев; заедание передачи; повреждение подшипников; повреждение (разрушение) нагруженных деталей и узлов (разрыв шлангов высокого давления, повреждение гидрооборудования и т. п.).

2. Каждый элемент может находиться в двух несовместных состояниях: работоспособном и неработоспособном.

3. Распределение наработки до отказа и времени восстановления отдельных элементов является экспоненциальным, то есть процесс функционирования изделия является стационарным, без последствия (благодаря использованию блокировок, предохранительных клапанов и независимых источников питания отказ одного элемента не провоцирует возникновение отказов других элементов), и ординарным.

Интенсивность отказов элементов механизма

№ п/п	Блок	Элемент	$\lambda_i \cdot 10^{-6},$ ч ⁻¹
1	Передача главная, ряд планетарный суммирующий, передача бортовая левая, передача бортовая правая	–	0,2
2	Система смазки	фильтр	0,3
		гидронасос	8,74
		рукава РВД	3,93
3	Следящая система управления	гидропневмоаккумулятор (ГПА)	6,1
		блок управления тормозами (ручной тормоз)	3,55
		блок управления тормозами (ножной тормоз)	3,55
		клапан давления	5,6
		клапан зарядки ГПА	5,6
		гидронасос	8,74
		рукава РВД	3,93
		гидромотор	1,8
		гидронасос	8,74
		гидрораспределитель	3,55
		электрогидрораспределитель	3,55
		блок питания	6,1
	рукава РВД	3,93	

4. Надежность средств контроля идеальна, отказавшие элементы начинают восстанавливать немедленно; отсутствуют ограничения на число восстановлений; на интервале восстановления отказы не возникают (это обеспечивается правильной организацией системы технического обслуживания и ремонта изделия).

Теперь по имеющимся сведениям о надежности элементов и о связях между элементами, а также с учетом принятых допущений проведем расчет надежности БДМПССУ.

Начнем с расчета величины наработки на отказ БДМПССУ – показателя безотказности восстанавливаемого изделия, который определяет среднее время между соседними отказами.

Согласно выражению

$$T_n(t) = \int_0^t K_r(t) dt, \quad (1)$$

расчет наработки на отказ БДМПССУ требует определения комплексного показателя надежности – функции готовности $K_r(t)$. Одним из методов определения функции готовности является метод дифференциальных уравнений [5].

Для использования этого метода составлена математическая модель БДМПССУ в виде графа состояний (множества следующих состояний системы, в которых она может находиться при отказах и восстановлении: 0 – работоспособное состояние БДМПССУ; 1 – состояние отказа БДМПССУ из-за отказа ССУ; 2 – состояние отказа БДМПССУ из-за отказа БДМП) (рис. 1).

Расчет и конструирование

На рис. 1 указаны следующие величины: λ_1 – интенсивность отказов ССУ ($\lambda_1 = (2 \cdot 8,74 + 2 \cdot 3,93 + 2 \cdot 5,6 + 4 \cdot 3,55 + 2 \cdot 6,1 + 1,8) \cdot 10^{-6} = 64,74 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$); λ_2 – интенсивность отказов БДМП, включающей главную передачу, планетарный ряд, левую и правую бортовые передачи и систему смазки ($\lambda_2 = (4 \cdot 0,2 + 0,3 + 8,74 + 3,93) \cdot 10^{-6} = 13,77 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$); μ_1 – интенсивность восстановления каждого из 13 элементов ССУ ($\mu_1 = 0,5 \text{ ч}^{-1}$); μ_2 – интенсивность восстановления каждого из 7 элементов БДМП ($\mu_2 = 0,125 \text{ ч}^{-1}$).

Чтобы предельно уменьшить затраты труда на расчет функции готовности по графу состояний (см. рис. 1), последний укрупнен объединением состояний 1 и 2 в одно состояние 12 (рис. 2).

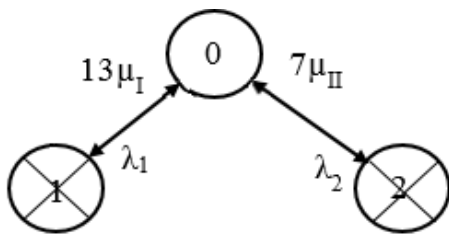


Рис. 1. Граф состояний БДМПССУ

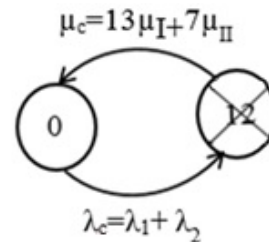


Рис. 2. Укрупненный граф состояний БДМПССУ

Система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний (уравнения Колмогорова), составленная по графу (см. рис. 2), имеет вид

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda_c P_0(t) + \mu_c P_{12}(t), \\ P_{12}'(t) = \lambda_c P_0(t) - \mu_c P_{12}(t). \end{cases} \quad (2)$$

С учетом начальных условий $P_0(0) = 1$, $P_{12}(0) = 0$ уравнения (2) записаны в операторной форме

$$\begin{cases} sP_0(s) - 1 = -\lambda_c P_0(s) + \mu_c P_{12}(s), \\ sP_{12}(s) = \lambda_c P_0(s) - \mu_c P_{12}(s). \end{cases} \quad (3)$$

Решение (3) в операторной форме имеет вид

$$K_r(s) = P_0(s) = \frac{\mu_c + s}{s(s + (\lambda_c + \mu_c))} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \mu_c} \cdot \frac{1}{s + (\lambda_c + \mu_c)}. \quad (4)$$

Выражению (4) во временной форме соответствует функция готовности вида

$$K_r(t) = P_0(t) = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c} + \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \mu_c} e^{-(\lambda_c + \mu_c)t}, \quad (5)$$

а с учетом числовых значений λ_c и μ_c

$$K_r(t) = P_0(t) = 0,9999894 + 0,0000106 \cdot e^{-7,3750785 \cdot t}. \quad (6)$$

Функция готовности (6) не учитывает нагрузок, которые возникают при эксплуатации БДМПССУ в составе подвижного объекта. Влияние эксплуатационных нагрузок легко учесть введением поправочного коэффициента эксплуатации a , который показывает, во сколько раз возрастают интенсивности отказов элементов изделия. Так, для элементов автомобильной аппаратуры $a = 40$ [18, 19]. С учетом увеличения интенсивности отказов элементов в 40 раз ($\lambda_c = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ (ч}^{-1}\text{)})$ из (5) получим

$$K_r(t) = P_0(t) = 0,9995744 + 0,0004256 \cdot e^{-7,37814 \cdot t}. \quad (7)$$

По выражениям (1) и (7) проведен следующий расчет наработку на отказ БДМПССУ

$$T_n(2000) = \int_0^{2000} (0,9995744 + 0,0004256 \cdot e^{-7,37814 \cdot t}) dt = 0,9995744 \cdot 2000 + 0,0004256 \cdot e^{-7,37814 \cdot 2000} \cdot (-7,37814) = 1999,$$

т. е. наработка на отказ за 2000 часов составляет 1999 моточасов, что удовлетворяет требованиям задания.

Долговечность БДМПсССУ оценим величиной срока службы. Срок службы изделия – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации изделия до его списания, обусловленного предельным состоянием [20]. Причем под предельным состоянием разработанного БДМПсССУ будем считать состояние, при котором его ремонт становится экономически нецелесообразным ввиду его низкой надежности.

Согласно (7) через 5 лет (43800 ч) после начала эксплуатации коэффициент готовности составит $K_T(43800) = 0,99957$,

т. е. за плановый срок службы БДМПсССУ (5 лет) с установленной системой технического обслуживания и ремонтов не наступит предельное состояние изделия, определяемое как состояние, при котором дальнейшая эксплуатация изделия недопустима/нецелесообразна из-за не устраненных по тем или иным причинам нарушений работоспособности, а значит срок службы до списания БДМПсССУ – не менее 5 лет.

Особенность приведенных расчетов показателей надежности БДМПсССУ в том, что в них сделан акцент на конструктивные, а не на производственные и эксплуатационные отказы. Это позволяет убедиться в грамотности принятых на этапе проектирования решений, в том числе решения об унификации и стандартизации деталей, узлов, решения об использовании высоконадежных элементов и узлов. Это оправдано не только повышением надежности изделия, но и сокращением его стоимости.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Разработка бесступенчатого дифференциального механизма поворота со следящей системой управления для внедорожных и дорожно-строительных машин нового поколения» по соглашению № 074-11-2018-006 от 31.05.2018 г. между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и Обществом с ограниченной ответственностью Производственная компания «Ходовые системы» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Литература

1. Труханов, В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытаний образцов / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2008. – 585 с.
2. ГОСТ Р 27.607-2013 Надежность в технике (ССНТ). Управление надежностью. Условия проведения испытаний на безотказность и статистические критерии и методы оценки их результатов. – М.: Стандартинформ, 2015. – 50 с.
3. Викторова, В.С. Модели и методы расчета надёжности технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. – Изд. 2, испр. – М.: Издательская группа URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2016. – 256 с.
4. Журавлев, С.Ю. Надежность технических систем: учеб. пособие / С.Ю. Журавлев. – Красноярск: Изд-во КГАУ, 2013. – 331 с.
5. Матвеевский, В.Р. Надежность технических систем: учебное пособие / В.Р. Матвеевский. – М.: МГИЭМ, 2002. – 113 с.
6. Reliability analysis of a complex system with hybrid structures and multi-level dependent life metrics / Lechang Yang, Pidong Wang, Qiang Wang et al. // Reliability Engineering and System Safety. – 2021. – Vol. 209. – Number 107469. – <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107469>.
7. A variable and mode sensitivity analysis method for structural system using a novel active learning Kriging model / Qing Guo, Yongshou Liu, Bingqian Chen, Qin Yao // Reliability Engineering and System Safety. – 2021. – Vol. 206, Number 107285. – <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107285>.
8. Shaomin, Wu. Two methods to approximate the superposition of imperfect failure processes / Wu. Shaomin // Reliability Engineering and System Safety. – 2021. – Vol. 207, Number 107332. – <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107332>.
9. Sinan, Xiao A new effective screening design for structural sensitivity analysis of failure probability with the epistemic uncertainty / Xiao Sinan, Lu Zhenzhou, Liyang Xu. // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 156. – P. 1–14. – <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.07.014>.

Расчет и конструирование

10. *Algorithms for Bayesian network modeling and reliability inference of complex multistate systems: Part I – Independent systems* / Xiaohu Zheng, Wen Yao, Yingchun Xu, Xiaoqian Chen // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2020. – Vol. 202. – <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107011>.

11. *Bei, Wu. Reliability evaluation of Markov renewal shock models with multiple failure mechanisms* / Wu Bei, Cui Lirong // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2020. Vol. 202, 107051. – <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107051>.

12. *Reliability analysis using a multi-metamodel complement-basis approach* / Rui Teixeira, Beatriz Martinez-Pastor, Maria Nogal, Alan O'Connor // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2021. – Vol. 205. – <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107248>.

13. *Dooyoul, Lee Analysis of the reliability of a starter-generator using a dynamic Bayesian network* / Lee Dooyoul, Choi Dongsu // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2020. – Vol. 195. – Number 106628. – <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106628>.

14. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике (ССНТ). Расчет надежности. Основные положения. – Минск: Изд-во стандартов, 1994. – 19 с.

15. Павловская, О.О. Основы прикладной теории надежности: учебное пособие / О.О. Павловская. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2020. – 97 с.

16. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

17. ГОСТ 27434-87 Тракторы промышленные. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.

18. Кузнецов, А.С. Надежность радиоловительской аппаратуры / Кузнецов, А.С. // Большая энциклопедия нефти и газа. – <https://www.ngpedia.ru/pg6195263i17YkyX0053060971>.

19. *Reliability assessment of complex electromechanical systems under epistemic uncertainty* / Jinhua Mi, Yan-Feng Li, Yuan-Jian Yang et al. // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2016. – Vol. 152. – P. 1–15. – <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.003>.

20. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

Павловская Ольга Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, olyarav@rambler.ru.

Закиров Рамиль Агзамович, кандидат технических наук, директор НИИ «Опытное машиностроение», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, zakirovra@susu.ru.

Землянский Юрий Матвеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, zem.yuriy4612@mail.ru.

Кондаков Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, sv@mail.ru.

Подживотова Ирина Александровна, младший научный сотрудник УНИД, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, podzhivotovaia@susu.ru.

Поступила в редакцию 8 февраля 2021 г.

CALCULATION OF RELIABILITY OF THE STEPLESS ROTATION MECHANISM OF AN INDUSTRIAL TRACTOR WITH A TRACKING CONTROL SYSTEM

O.O. Pavlovskaya, olyapav@rambler.ru,
R.A. Zakirov, zakirovra@susu.ru,
Yu.M. Zemlyansky, zem.yuriy4612@mail.ru,
S.V. Kondakov, tanksv@mail.ru,
I.A. Podzhivotova, podzhivotovaia@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The authors of the article determined the level of reliability of the stepless differential rotation mechanism with a tracking control system (SDRMTCS), achieved at the stage of its design and manufacture. Based on the results of the analysis of the structure of this mechanism, the concept of a failure of the SDRMTCS is defined. A mathematical model of reliability SDRMTCS as restoring the products obtained graph States based on a number of assumptions, including the assumption of stationarity, the lack of follow-through and the ordinary process of functioning of the product. When determining the parameters of the mathematical model of the SDRMTCS, statistical data on the failure rates and failure times of the component parts of the product, obtained during the testing of analog devices, were used. The product readiness function is determined by solving the system of Kolmogorov differential equations under the given initial conditions. The readiness function is calculated taking into account the loads that occur during the operation of the SDRMTCS as part of a mobile object, by introducing a correction factor for the failure rates of the elements of the product. Using the availability function, the value of the failure rate (failure rate) and the value of the service life (durability indicator) are determined. Both reliability indicators meet the requirements of the task. The peculiarity of the above calculations of the reliability of the SDRMTCS is that they focus on constructive, rather than on production and operational failures. This helped to ensure literacy adopted at the design stage SDRMTCS decisions, including decisions on the harmonization and standardization of parts, assemblies, decisions about the use of highly reliable components and assemblies. This is justified not only by increasing the reliability of the product, but also by reducing its cost.

Keywords: reliability, time to failure, service life before decommissioning, stepless rotation mechanism, tracking control system.

The work has been performed with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of complex project to create a high-tech production “Development of a stepless differential steering mechanism with tracking control system for new generation off-road and road-building machines” under the agreement No. 074-11-2018-006 d.d. May, 31, 2018 between the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and Manufacturing company “Khodovye system” in cooperation with the head executor “NIOKTR” – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “South Ural State University (National Research University)”.

References

1. Trukhanov V.M. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem tipa podvizhnykh ustanovok na etape proyektirovaniya i ispytaniy obraztsov*. [Reliability of Technical Systems Such as Mobile Units at the Design Stage and Sample Testing]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 585 p.
2. GOST R 27.607-2013 *Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Upravleniye nadezhnost'yu. Usloviya provedeniya ispytaniy na bezotkaznost' i statisticheskiye kriterii i metody otsenki ikh rezul'tatov*. [State Standard 27.607-2013 Reliability in Engineering (SSNT). Reliability Management. Conditions for Testing Reliability and Statistical Criteria and Methods for Evaluating Their Results.]. Moscow, Standardinform, 2015. 50 p.
3. Viktorova V.S. *Modeli i metody rascheta nadozhnosti tekhnicheskikh sistem* [Models and methods for calculating the reliability of technical systems]. Ed. 2, rev. Moscow, Publishing group URSS, LLC “LENAND”, 2016. 256 p.

4. Zhuravlev S.Yu. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobiye*. [The reliability of technical systems: Textbook]. Krasnoyarsk, KGAU Publ., 2013, 331 p.
5. Matveyevskiy V.R. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: uchebnoye posobiye*. [Reliability of technical systems: a tutorial]. Moscow, MGIEiM, 2002. 113 p.
6. Lechang Yang, Pidong Wang, Qiang Wang, Sifeng Bi, Rui Peng, Jasper Behrendorf, Michael Beer. Reliability analysis of a complex system with hybrid structures and multi-level dependent life metrics. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, vol. 209, number 107469. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107469>.
7. Qing Guo, Yongshou Liu, Bingqian Chen, Qin Yao. A variable and mode sensitivity analysis method for structural system using a novel active learning Kriging model. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, vol. 206, number 107285. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107285>
8. Shaomin Wu. Two methods to approximate the superposition of imperfect failure processes. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, vol. 207, number 107332. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107332>.
9. Sinan Xiao, Zhenzhou Lu, Liyang Xu. A new effective screening design for structural sensitivity analysis of failure probability with the epistemic uncertainty. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 156, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.07.014>.
10. Algorithms for Bayesian network modeling and reliability inference of complex multistate systems: Part I – Independent systems / Xiaohu Zheng, Wen Yao, Yingchun Xu, Xiaoqian Chen // *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, vol. 202. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107011>
11. Bei Wu, Lirong Cui. Reliability evaluation of Markov renewal shock models with multiple failure mechanisms. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, vol. 202, number 107051. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107051>.
12. Rui Teixeira, Beatriz Martinez-Pastor, Maria Nogal, Alan O'Connor. Reliability analysis using a multi-metamodel complement-basis approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, vol. 205. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107248>.
13. Dooyoul Lee, Dongsu Choi. Analysis of the reliability of a starter-generator using a dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, vol. 195, number 106628. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106628>.
14. GOST 27.301-95 *Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Raschet nadezhnosti. Osnovnyye polozheniya*. [Reliability in Engineering (SSNT). Reliability calculation. Basic provisions]. Minsk, 1994. 19 p.
15. Pavlovskaya, O.O. *Osnovy prikladnoy teorii nadezhnosti: uchebnoye posobiye* [Fundamentals of Applied Reliability Theory: textbook]. Chelyabinsk: Publishing center of South Ural St. Univ, 2020. 97 p.
16. GOST 12.1.004-91 [State Standard 12.1.004-91 Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements]. Moscow, Standardinform, 2006. 68 p.
17. GOST 27434-87 *Traktory promyshlennyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya*. [State Standard 27434-87 Industrial tractors General technical conditions]. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2003. 8 p.
18. Kuznetsov, A.S. *Nadezhnost' radiolyubitel'skoy apparatury / Bol'shaya entsiklopediya nefti i gaza*. [Reliability of radio amateur equipment / Big encyclopedia of oil and gas]. Available at: <https://www.ngpedia.ru/pg6195263i17YkyX0053060971/>.
19. Jinhua Mi, Yan-Feng Li, Yuan-Jian Yang, Weiwen Peng, Hong-Zhong Huang. Reliability assessment of complex electromechanical systems under epistemic uncertainty. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 152, pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.02.003/>
20. GOST 27.002-2015 [Dependability in technics. Terms and definitions]. Moscow, Standardinform Publ., 2016. 28 p.

Received 8 February 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Расчет надежности бесступенчатого механизма поворота промышленного трактора со следящей системой управления / О.О. Павловская, Р.А. Закиров, Ю.М. Землянский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 29–36. DOI: 10.14529/engin210103

FOR CITATION

Pavlovskaya O.O., Zakirov R.A., Zemlyansky Yu.M., Kondakov S.V., Podzhivotova I.A. Calculation of reliability of the stepless rotation mechanism of an industrial tractor with a tracking control system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 29–36. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin210103