

УДК 621.0:519.873

DOI:10.30987/2223-4608-2020-7-24-30

М.В. Заморёнов, к.т.н., **В.Я. Копп**, д.т.н.,
Ю.Л. Рапацкий, к.т.н., **Д.В. Заморёнова**, к.т.н. **В.М. Липка**, аспирант
(Севастопольский государственный университет,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)
E-mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

Анализ процесса функционирования технологического комплекса с различными видами обесценивающих отказов методом траекторий*

Рассмотрено применение метода траекторий, позволяющего моделировать процесс функционирования полумарковских систем. Приведен пример технологического комплекса, при функционировании которого возможны различные отказы. Проведено моделирование технологического комплекса с учетом обесценивающих отказов; подтверждена точность метода траекторий.

Ключевые слова: полумарковская модель; метод траекторий; обесценивающие отказы; резьбовое соединение.

M.V. Zamoryonov, Can. Sc. Tech., **V.Ya. Kopp**, Dr. Sc. Tech.,
Yu.L. Rapatsky, Can. Sc. Tech., **D.V. Zamoryonova**, Can. Sc. Tech., **V.M. Lipka**, Post graduate student
(Sevastopol State University, 33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053)

Process analysis of technological complex operation with different kinds of depreciating failures by path methods

The application of a path method allowing the simulation of the process of semi-mark system operation is considered. There is shown a sample of the technological complex during the operation of which various failures are possible. The simulation of the technological complex taking into account depreciating failures is carried out; the accuracy of the path method is confirmed.

Keywords: semi-mark model; path method; depreciating failures; threaded connection.

Введение

В связи с возрастающими требованиями к эффективности технологических систем, все большую актуальность приобретают вопросы повышения надежности механосборочного производства. Для сборки сложных изделий машиностроения из узлов и деталей широко применяются резьбовые соединения (РС). При изготовлении резьбовых соединений можно

* Исследования выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-01-00704.

выделить две основные стадии: получение деталей с резьбой и сборка. При изготовлении высокопрочных болтов и шпилек наиболее эффективным является накатывание резьбы роликами.

Основная часть

Этапы жизненного цикла изделий машиностроения, включающие изготовление деталей с резьбой и сборку резьбовых соединений, а также последующую эксплуатацию, тесно связаны между собой посредством технологической наследственности [1, 2], что приводит к необходимости системного подхода к

анализу механосборочного производства.

В ряде публикаций, в частности [1, 3 – 7], показана эффективность аппарата полумарковских процессов [8 – 10] для исследования производительности и надежности механосборочного производства, применительно к которому технологическая наследственность может быть описана на основе учета последствий. Вместе с тем математические модели для исследования производительности и надежности механосборочного производства с учетом технологической наследственности недостаточно разработаны.

Отказы технологического комплекса (ТК) можно разделить на два типа: обесценивающие (в случае отказа обслуживание продукции прерывается, а после восстановления его работоспособности обслуживание продукции начинается сначала) и необесценивающие (в случае отказа ТК обслуживание продукции прерывается, а после восстановления его работоспособности обслуживание продукции продолжается, с учетом времени прерванного обслуживания) [4, 5].

Целью данных исследований является построение математической модели процесса функционирования ТК для определения его производительности, с учетом различных видов обесценивающих отказов, на основе мето-

да траекторий [8].

При анализе надежности процесса резбонакатывания целесообразно рассматривать не только отказы оборудования, но также и выход параметров резбовых деталей за пределы допусков. Необходимо отметить, что геометрические и точностные параметры заготовок и готовых деталей, формируемые на каждом из технологических переходов, являются случайными величинами (СВ), математические ожидания (МО), дисперсии и функции распределения (ФР) которых могут быть получены путем статистической обработки и анализа результатов производственных экспериментов.

Экспериментальные распределения СВ, для удобства дальнейшего исследования, могут быть заменены законом Эрланга второго, а, при необходимости, более высоких порядков. С помощью критерия χ^2 было установлено, что полученные в результате экспериментов распределения случайные величины не противоречат закону Эрланга второго порядка.

По результатам обработки экспериментальных данных [1] и применения к ним методов экспертных оценок и анализа иерархий, выделены важнейшие факторы, определяющие надежность процесса резбонакатывания (табл. 1).

1. Экспериментальные значения математического ожидания для процесса получения наружной резьбы М10х1,25-6g резбонакатыванием

№	Виды и характер отказов технологического процесса	Время наработки на отказ, ч	Параметр λ закона Эрланга	Время восстановления, ч
1	Дефекты в накатанной резьбе из-за погрешности установки заготовок в станке	2,5	0,566	0,5
2	Погрешности размеров и формы резбовой поверхности, вызванные неравномерной твердостью и пластичностью материала заготовок, а также отклонениями формы и размеров фаски на заготовках	16,67	0,025	4,0
3	Возникновение микротрещин в накатанной резьбе из-за неисправности оборудования и нарушения технологических режимов	9,1	0,11	2,0
4	Недопустимый износ и повреждение резбонакатных роликов	40,0	0,035	5,0

Примечание. Время накатывания партии из 10 деталей 0,0083 часа

В табл. 2 приведены значения математических ожиданий, вычисленные в результате статистической обработки данных, полученных в ходе эксперимента, выполненного на автоматической линии сборки автомобильных двигателей. Количество высокопрочных болтов М10х1,25х100-6Н/6g из стали 40ХН в

групповом РС – 10 шт; момент затяжки – предварительный 44,2...54,0 Н·м, окончательный 74,6...84,4 Н·м обеспечивается дотяжкой 2×90°. Затяжка осуществлялась автоматизированным гайковертом с пневмоприводом и десятью шпинделями, работающими независимо.

2. Значения математических ожиданий по результатам экспериментального исследования процесса автоматизированной сборки групповых РС М10х1,25-6Н/6g

№	Виды и характер отказов технологического процесса	Время наработки на отказ, ч	Параметр λ закона Эрланга	Время восстановления, ч
1	Несоответствие натяжения стержня после затяжки номинальному значению (сверх допустимой погрешности)	6,3	0,22	2,0
2	Неравномерная затяжка группового РС	7,5	0,189	1,5
3	Разрушение резьбовых деталей в процессе сборки	14,6	0,097	4,0

Примечание. Время сборки одного изделия: 0,004 часа

По результатам экспериментальных исследований на этапе эксплуатации РС в изделиях машиностроения, отказы были сгруппированы по наиболее значимым причинам их возникновения следующим образом: разрушение резьбы (частичное либо полное, вызванное микротрещинами в резьбовой поверхности) – 15 % случаев; раскрытие стыка РС, вызванное отклонениями формы и размеров резьбовой поверхности, в т.ч. из-за неправильной установки заготовки при резьбонакатывании – 70 %; релаксация РС из-за неравномерной

твердости и прочности резьбовых деталей – 10 %; релаксация РС из-за дефектов, переданных резьбовым деталям в виде наследственной информации неисправными резьбонакатными роликами – 5 % случаев [1].

Отказы РС, не связанные с качеством крепежных деталей, в результатах экспериментов не учитывались. Количественные данные, после статистической обработки и применения методов экспертных оценок и анализа иерархий, приведены в табл. 3.

3. Экспериментальные значения математических ожиданий для этапа эксплуатации изделий с групповыми болтовыми РС М10х1,25-6Н/6g

№	Виды и характер отказов	Время наработки на отказ, ч	Параметр λ закона Эрланга	Время восстановления, ч
1	Разрушение резьбы (частичное либо полное, вызванное микротрещинами в резьбовой поверхности)	180,0	0,0078	15,5
2	Раскрытие стыка РС, вызванное отклонениями формы и размеров резьбовой поверхности, в т.ч. из-за неправильного положения заготовки при резьбонакатывании	90,5	0,0156	10,0
3	Релаксация группового РС из-за неравномерной твердости и прочности резьбовых деталей	160,5	0,0088	8,5
4	Релаксация РС из-за дефектов, переданных резьбовым деталям в виде наследственной информации неисправными резьбонакатными роликами	199,0	0,0071	9,5

Примечание. Время – 176 ч в месяц, 2000 ч в год

Параметры λ закона Эрланга, приведенные в табл. 1–3, вычислялись из соотношения: $\lambda = \sqrt{2} / M_i$, где M_i – значение математических ожиданий для i -го фактора.

Предлагаемая полумарковская математическая модель позволит оценить влияние надежности ТК на его производительность, с учетом вероятности возникновения различных отказов. Основным допущением при построении модели является предположение о том, что потоки событий в ТК обладают последовательным.

Необходимо определить функции распределения $F_{\varepsilon}(t)$ (СВ) ε - времени между двумя соседними моментами окончания обслуживания продукции с учетом отказов ТК, а также МО, дисперсию указанной СВ и производительность ТК. Обслуживанием продукции в данном случае будем считать обработку заготовок, сборку изделий, а, в общем случае, – технологические либо эксплуатационные воздействия, осуществляемые с целью изготовления готовой продукции и применения ее по назначению. Единицей продукции, в зависи-

мости от этапа жизненного цикла, рассматриваемого при моделировании, будем считать заготовку, деталь, узел либо изделие в целом.

Примем, что время обслуживания единицы продукции на ТК – СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P\{\alpha_1 \leq t\}$. Время безотказной работы ТК – СВ α_2 с ФР $F_2(t) = P\{\alpha_2 \leq t\}$, время восстановления ТК после i -го типа отказа – СВ β_i с ФР $G_i(t) = P\{\beta_i \leq t\}$. СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_i$ предполагаются независимыми, имеющими конечные МО и дисперсии; у ФР $F_1(t), F_2(t), G_i(t)$ существуют плотности $f_1(t), f_2(t), g_i(t)$. Возникновение отказа i -го типа происходит с вероятностью p_i . При отказе ТК обслуживание единицы продукции прерывается, после восстановления его работоспособности прерванное обслуживание единицы продукции начинается сначала.

Для описания функционирования ТК используем процесс марковского восстановления ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующий ему полумарковский процесс (ПМП) $\xi(t)$ со следующими состояниями [9]:

10x – ТК работоспособен, началось обслуживание очередной единицы продукции; время, оставшееся до отказа ТК, равно $x > 0$;

11x – мгновенное состояние, соответствующее моменту окончания обслуживания единицы продукции; время, оставшееся до отказа ТК, равно $x > 0$;

20 – произошло восстановление работоспо-

собности ТК, прерванное обслуживание единицы продукции начинается сначала;

21i – произошел отказ ТК i -го типа, обслуживание единицы продукции прервано.

Граф переходов системы приведен на рис. 1. Фазовое пространство состояний имеет вид $E = \{10x, 11x, 20, 21i\}$.

Опишем вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ):

$$P_{10x}^{11y} = f_1(x-y), 0 < y < x; P_{10x}^{21i} = p_i \bar{F}_1(x);$$

$$P_{11x}^{10x} = 1;$$

$$P_{20}^{11y} = \int_0^{\infty} f_2(y+t) f_1(t) dt; y > 0;$$

$$P_{20}^{21i} = p_i \int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_2(t) dt; P_{21}^{20} = 1$$

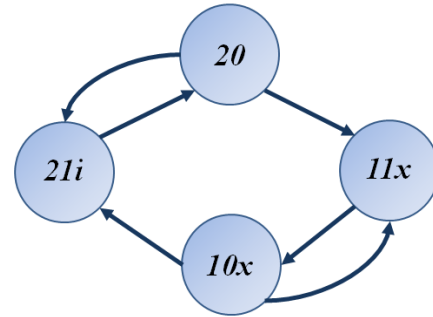


Рис. 1. Граф состояний ТК

Система интегральных уравнений для стационарных плотностей имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{10}(x) &= \rho_{11}(x) = \int_0^x f_1(y-x) \rho_{10}(y) dy + \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(x+t) f_1(t) dt; \\ \rho_0 &= \rho_0 \int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_2(t) dt + \int_0^{\infty} \bar{F}_1(x) \rho_{10}(x) dx; \\ 2\rho_0 &+ \int_0^{\infty} (\rho_{11}(x) + \rho_{10}(x)) dx = 1. \end{aligned} \right.$$

Решением системы уравнений является

$$\rho_{20} = \rho_0$$

$$\rho_{21i} = p_i \rho_0;$$

$$\rho_{10}(x) = \rho_{11}(x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(x+y) h_1(y) dy,$$

где p_i – вероятность возникновения отказа i -го типа [6]:

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\Sigma}},$$

$$\text{где } \lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i; h_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_1^{*(n)}(t) - \text{плот-}$$

ность функции восстановления процесса с временем восстановления α_1 .

Постоянная ρ_0 находится из условия нормировки.

Время пребывания в состояниях равно:

$$v_{10x} = x \wedge \alpha_1; v_{11x} = 0; v_{21i} = \beta_i; v_{20} = \alpha_1 \wedge \alpha_2.$$

ФР времени пребывания в состояниях имеют вид:

$$\bar{F}_{10x}(t) = \bar{1}_x(t) \cdot \bar{F}_1(t); F_{21i}(t) = G_i(t);$$

$$\bar{F}_{20}(t) = \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_2(t).$$

Граф состояний системы с дискретными состояниями представлен на рис. 2.

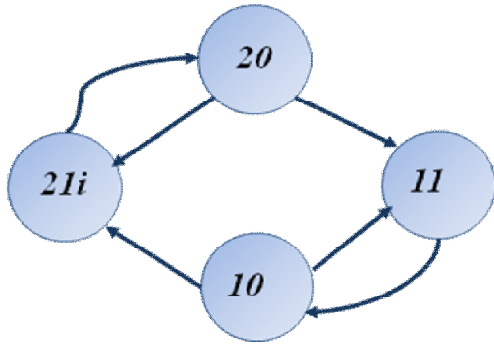


Рис. 2. Граф состояний системы с дискретными состояниями

Необходимо определить вероятности переходов, стационарное распределение ВЦМ и ФР времени пребывания системы в состояниях 10 и 20 системы с дискретными состояниями, используя формулы [9]:

$$\hat{P}_{k,r} = \frac{\int_0^\infty \rho(dx)P(x, E_r)}{\rho(E_k)}; \quad (1)$$

$$\hat{F}_k(t) = \frac{\int \rho(dx)F_x(t)}{\rho(E_k)} \quad (2)$$

Для состояний 20 и 21:

$$\rho_{20} = \rho_0$$

$$\rho_{21i} = p_i \rho_0;$$

$$P_{20}^{21i} = p_i \int_0^\infty \bar{F}_1(t) f_2(t) dt \quad P_{20}^{11} = \int_0^\infty F_1(t) f_2(t) dt$$

Для состояния 10:

$$\rho_{11} = \rho_{10} = \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f_2(x+y) h_1(y) dy = \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(y) h_1(y) dy.$$

По формуле (1) находим вероятности переходов P_{10}^{21i} и P_{10}^{11} :

$$P_{10}^{21i} = \frac{\rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f_2(x+y) h_1(y) p_i \bar{F}_1(x) dy}{\rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(y) h_1(y) dy} = \frac{p_i \int_0^\infty h_1(y) dy \int_0^\infty f_2(x+y) \bar{F}_1(x) dx}{\int_0^\infty \bar{F}_2(y) h_1(y) dy};$$

$$P_{10}^{11} = \frac{\rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f_2(x+y) h_1(y) F_1(x) dy}{\rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(y) h_1(y) dy} = \frac{\int_0^\infty h_1(y) dy \int_0^\infty f_2(x+y) F_1(x) dx}{\int_0^\infty \bar{F}_2(y) h_1(y) dy}.$$

Найдем ФР времени пребывания системы в дискретном состоянии 10, используя выражение (2) [8]:

$$\hat{F}_{10}(t) = \frac{\rho_0 \int_0^\infty [1 - \bar{1}_x(t) \cdot \bar{F}_1(t)] \int_0^\infty f_2(x+y) h_1(y) dy dx}{\rho_0 \int_0^\infty \int_0^\infty f_2(x+y) h_1(y) dy dx}.$$

Преобразовав данное выражение, получим:

$$\hat{F}_{10}(t) = 1 - \bar{F}_1(t) + \frac{\int_0^\infty h_1(y) \bar{F}_2(y+t) dy}{\int_0^\infty h_1(y) \bar{F}_2(y) dy} \cdot \bar{F}_1(t).$$

Имеются два подмножества:

$$M_+ = \{10, 21i, 20\} \text{ и } M_- = \{11\}.$$

Определим траектории [8] выхода системы в подмножество M_- (рис. 3):

$$T_1 = \{S_{10} S_{11}\}, \quad T_{2i} = \{S_{10} S_{21i} S_{10} S_{11}\}.$$

Определим ФР времен пребывания системы в состояниях 21i и 20 системы, с учетом повторных попаданий в них, по формуле (1):

$$F_{20}^2(s) = \frac{\hat{F}_{20}(s)}{c_{20} - (c_{20} - 1) \hat{f}_{20}(s)};$$

$$F_{21i}^2(s) = \frac{\hat{F}_{21i}(s)}{c_{21} - (c_{21} - 1)\hat{f}_{21i}(s)},$$

где $c_{20}^2 = \frac{\rho_{20}}{\rho_{20} \cdot P_{20}^{11}} = \frac{1}{P_{20}^{11}}$; $c_{21}^2 = \frac{\rho_{21}}{\rho_{21} \cdot P_{20}^{11}} = \frac{1}{P_{20}^{11}}$.

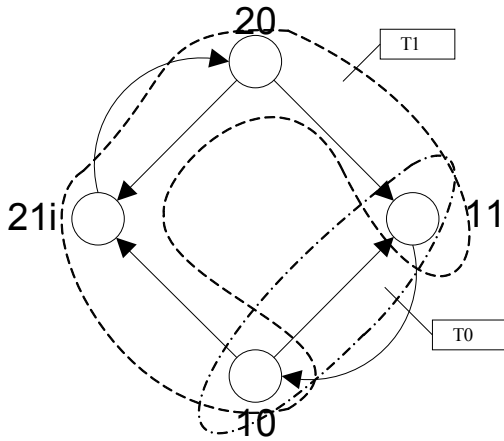


Рис. 3. Траектории выхода системы из подмножества $M_+ = \{10, 21i, 20\}$

С помощью последовательной свертки, определим ФР времени пребывания системы в каждой траектории [8]:

$$F_1^T(t) = F_{10}(t),$$

$$F_{2i}^T(t) = F_{10}(t) * F_{21i}^2(t) * F_{20}^2(t),$$

где * – знак операции свертки.

Найдем вероятности реализации каждой из траекторий:

$$P_1^T = P_{10}^{11}, \quad P_{2i}^T = P_{10}^{21i}.$$

Причем $P_1^T + P_2^T = 1$.

Отсюда становится возможным определить ФР $F_{\Sigma}^{\theta}(t)$ времени пребывания системы в подмножестве M_+ вне зависимости от начального состояния, как взвешенную сумму (смесь) ФР времени пребывания системы в подмножестве каждой траектории с коэффициентами, равными вероятностям реализации этих траекторий:

$$F_{\Sigma}^{\theta}(t) = F_1^T(t) \cdot P_1^T + \sum_{i=1}^n F_{2i}^T(t) \cdot P_{2i}^T,$$

где n – количество типов отказов, на основании обработки данных экспериментов [1].

Как правило, количество типов отказов n , после применения к экспериментальным данным методов экспертных оценок и анализа иерархий, не превышает трех-четырёх, наиболее значимых для рассматриваемого процесса, что позволяет существенно упростить проце-

дуру моделирования.

Результаты моделирования (ФР $F_{\Sigma}(t)$) получены на основе формализованных исходных данных, которыми являются ФР $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, и $G_2(t)$; распределенные по закону Эрланга второго порядка с параметрами λ_1 , λ_2 ; μ_1 , μ_2 ; ν_1 , ν_2 ; r_1 , r_2 соответственно; причем:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$f_2(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

$$g_1(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1},$$

$$g_2(t) = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1}.$$

На рис. 4 приведен график функции распределения $F_{\Sigma}(t)$, полученной путем реализации предложенной полумарковской модели в среде Maple.

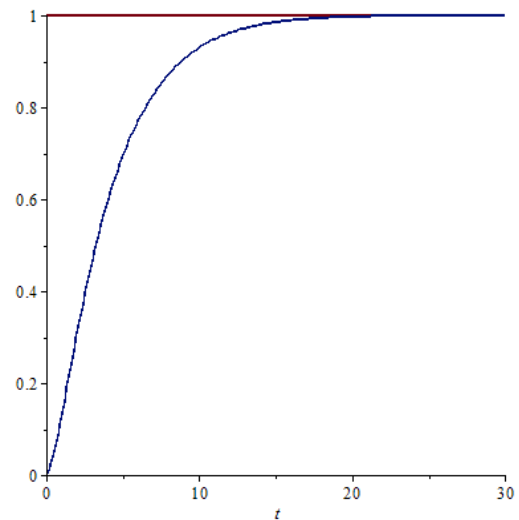


Рис. 4. Вид ФР времени пребывания системы в подмножестве E_+

В качестве примера исходных данных для моделирования, были использованы значения из табл. 1 для четырех, наиболее значимых видов отказов процесса резбонакатывания. Для оценки точности расчетов по предложенной модели, сравним вычисленные по ней значения МО ФР, с полученными с помощью выражения [10]:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in M_+} m_i \rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_i}. \quad (3)$$

Математические ожидания ФР, полученной в рассматриваемом примере в результате расчета по предложенной модели, с использова-

нием метода траекторий, составляет $4,194805194805194805$ ч, а вычисленное с помощью выражения (3) – $4,194805194805194805$ ч, что является совпадением с точностью до девятнадцатого знака после запятой. Расчеты, проведенные по предложенной модели и с помощью выражения (3) для других наборов исходных данных, также подтвердили практически полное совпадение результатов.

Выводы

Таким образом, сравнение результатов моделирования с использованием предложенной и известной моделей подтверждает высокую точность и эффективность модели, построенной с применением метода траекторий. Предложенная модель является универсальной для исследования производительности и надежности различных иерархических уровней в структуре механосборочного производства, с учетом их стохастичности.

Результаты моделирования предыдущего иерархического уровня могут являться исходными данными для следующего уровня, что позволяет исследовать сложные технологические системы в механосборочном производстве, с учетом технологической наследственности. Важным преимуществом предложенной модели является значительное упрощение процесса моделирования, в частности, для получения результата не требуется решение интегральных уравнений.

Направление дальнейших исследований связано с апробацией эффективности предложенного в [8] метода траекторий и разработанной на его основе полумарковской модели для анализа различных технических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапакский, Ю.Л., Загорёнов, М.В., Копп, В.Я., Обжерин, Ю.Е., Липка, В.М. Влияние технологической наследственности на надежность резьбовых соединений на этапах жизненного цикла изделий машиностроения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – № 6. – С. 332-353.
2. Аверченков, В.И., Васильев, А.С., Хейфец, М.Л. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – №10(88). – С.27-32.
3. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
4. Копп, В.Я., Обжерин, Ю.Е., Песчанский, А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. –

Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. – 284 с.

5. Obzherin Yu.E., Boyko Ye.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. Elsevier, Academic press, USA, 2015. – 214 p.

6. Копп, В.Я. Влияние простоев на производительность дискретных автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, И.В. Ольшанская, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – 212 с.

7. Копп, В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 240 с.

8. Загорёнов, М.В., Копп, В.Я., Обжерин, Ю.Е., Загорёнова, Д.В. Апробация метода траекторий на примере моделирования процесса функционирования производственного элемента с обесценивающими отказами // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 8: в 2 ч. Ч. 1. – С. 57–70.

9. Королюк, В.С., Турбин, А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – Киев: Наук. думка, 1982. – 236 с.

10. Королюк, В.С. Стохастические модели систем – Киев: Наук. думка. 1989. – 208 с.

REFERENCES

1. Rapatsky, Yu.L., Zamoryonov, M.V., Kopp, V.Ya., Obzherin, Yu.E., Lipka, V.M. Technological Inheritance Impact upon Threaded Connection Reliability at Life Stages of Mechanical Engineering Products // *TulSU Proceedings. Engineering Sciences*. – 2019. – No.6. – pp. 332-353.
2. Averbchenkov, V.I., Vasiliev, A.S., Heifets, M.L. Technological inheritance at quality formation of parts manufactured // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.10 (88). – pp. 27-32.
3. Ventsel, E.S. *Probability Theory*. – M.: Higher School, 1999. – pp. 576.
4. Kopp, V.Ya., Obzherin, Yu.E., Peschanky, A.I. *Stochastic Models of Automated Production Systems with Time Reservation*. – Sevastopol: SevNTU Publishers, 2000. – pp. 284.
5. Obzherin Yu.E., Boyko Ye.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. Elsevier, Academic press, USA, 2015. – 214 p.
6. Kopp, V.Ya. *Idle Time Impact upon Productivity of Discrete Automated Production Systems* / V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, I.V. Olshanskaya, A.I. Peschansky. – Sevastopol: SevNTU Publishers, 2009. – pp. 212.
7. Kopp, V.Ya. *Automated Line Simulation* / V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, A.I. Peschansky. – Sevastopol: SevNTU Publishers, 2006. – pp. 240.
8. Zamoryonov, M.V., Kopp, V.Ya., Obzherin, Yu.E., Zamoryonova, D.V. Path method appraisal by simulation example of operation production element process with depreciating failures // *TulSU Proceedings. Engineering Sciences*. – 2015. – Issue 8: in 2 Parts. Part 1. – pp. 57-70.
9. Korolyuk, V.S., Turbin, A.F. *Processes of Mark Restoration in Problems of System Reliability*. – Kiev: Scientific Thought. 1989. – pp. 208.

Рецензент д.т.н. Ю.Е. Обжерин