

ISSN 1561-8358 (print)
УДК 531.8

Поступила в редакцию 11.04.2016
Received 11.04.2016

М. И. Кулак, Н. С. Голуб

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПУТИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация. Процессы и оборудование классифицируются по признакам взаимодействия элементов технологической системы. Надежность каждого класса технологических систем и реализуемых ими процессов будет разной в связи с различной сложностью выполняемых операций. Признаком, отражающим процесс и определяющим его свойства, является взаимодействие составляющих элементов технологического процесса, прежде всего инструмента и предмета обработки. Технологические процессы по зоне взаимодействия делятся на четыре класса: точечные, линейные, поверхностные и объемные.

Рассмотрены классы технологических процессов и определена надежность операций при производстве изделий. Показана взаимосвязь технологического пути предмета обработки и интенсивности отказов оборудования. Представлены расчеты технологического пути для каждого класса процессов. Рассчитаны интенсивность и вероятность отказов для всех классов технологических процессов.

В результате расчета технологического пути получена оценка надежности операций, выполняемых оборудованием для каждого класса процессов взаимодействия предмета обработки с инструментом. Получена закономерность изменения интенсивности отказов при уменьшении технологического пути, позволяющая количественно сравнивать надежность технологических процессов при их проектировании.

Ключевые слова: класс процесса, характер взаимодействия, надежность, технологический путь, интенсивность отказов

Для цитирования. Кулак, М. И. Оценка надежности производственных операций по технологическому пути обрабатывающего инструмента / М. И. Кулак, Н. С. Голуб // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 3. – С. 56–63.

M. I. Kulak, N. S. Golub

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

EVALUATION OF MANUFACTURING OPERATIONS RELIABILITY ON TECHNOLOGICAL PATH OF PROCESSING TOOLS

Abstract. Processes and equipment are classified based on mutual interactions between elements of a technological system. Reliability of each type of the technological system and operated process is different due to varying complexity of the performed operations. The main properties-determining feature of the process is the interaction of the constituent element of the technological process, mainly instrument and machining object.

Based on this, technological processes in the interaction zone are divided into four groups: pointed, linear, surface and volumetric. Groups of the technological processes and determination of the reliability of their operations during goods formation is described. Colligation of the technological path with component failure rate is shown. Calculations of the technological path for each group of processes are presented. Intensities and failure rates for the all groups of processes are calculated.

Based on the calculations of the object technological path, evaluation of reliability of performed operations for each group of the interactions was obtained. Obtained regularity of the component failure rate during decrease of the technological path allows quantitative comparison of the manufacturing operations reliability during its designing.

Keywords: process class, character interaction, reliability, technological path, failure rate

For citation. Kulak M. I., Golub N. S. Evaluation of manufacturing operations reliability on technological path of processing tools. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 3, pp. 56–63 (in Russian).

Введение. Развитие теории надежности происходит по двум основным направлениям. Первое основано на методах математической статистики. Применение математических методов в теории надежности предполагает наличие достаточного количества данных об отказах оборуду-

дования, накапливаемых в результате стендовых испытаний или в процессе его реальной эксплуатации [1].

Второе направление базируется на исследовании с помощью механики разрушения и других методов изучения физико-механических свойств материалов основных узлов машин или конструкций в процессе их испытаний или эксплуатации [2].

В современных условиях развитие этих направлений сталкивается с рядом трудностей, обусловленных возросшей сложностью оборудования. В результате отказы узлов современных технологических систем приходится классифицировать по большому количеству признаков. Получение данных об отказах в полном объеме по всем классификационным признакам сопряжено с многолетними испытаниями или наблюдениями [3]. В этих условиях системы классификации отказов имеют тенденцию к усложнению.

Традиционно объектами исследования в теории надежности являются машины и оборудование, хотя ее методы в ряде случаев применяются и для изучения сложных технологических систем и комплексов [1, 2]. Если рассматривать надежность технологических процессов, то отказы технологического оборудования составляют основную, но не единственную часть отказов [3].

Актуальность исследования надежности выполняемых технологических процессов повышается с усложнением модели совокупных технологических переделов, основанных на отражении нелинейных явлений взаимодействия элементов технологической системы [4].

В соответствии с классификацией, предложенной Л. Н. Кошкиным, признаком, отражающим сущность технологического процесса и определяющим его свойства, является взаимодействие двух обязательных составляющих – инструмента и предмета обработки. Такой критерий классификации вследствие его общности применим ко многим технологическим процессам и позволяет разделить это множество на четыре класса в соответствии с четырьмя возможными видами пространственного взаимодействия инструмента и предмета обработки: точечным, линейным, поверхностным и объемным [5]. Надежность каждого класса технологического процесса будет разной в зависимости от сложности выполняемых операций.

Целью работы является оценка надежности выполняемых технологических операций различных классов.

Анализ надежности операций технологических процессов. Рассмотрим характеристики технологических процессов каждого класса [5].

Единственным общим геометрическим элементом инструмента и предметом обработки процессов I класса является точка, последовательно вступающая во взаимодействие со всеми точками обрабатываемой поверхности, то есть технологический результат процесса определяется лишь действием одной точки инструмента на предмет обработки.

Характерное для процессов II класса линейное взаимодействие инструмента и предмета обработки выражается в том, что технологический результат процесса определяется действием рабочей линии инструмента. Технологически эффективными являются все точки рабочей линии, а не одна-единственная рабочая точка. Каждая из точек, лежащая на рабочей линии, последовательно взаимодействует уже не со всеми точками обрабатываемой поверхности, а лишь с точками, лежащими на траектории соответствующих рабочих точек. Каждая рабочая точка соответствует определенным множествам точек обрабатываемой поверхности. Общим геометрическим элементом инструмента и предмета обработки является уже не точка, а линия — геометрическая образующая обрабатываемой поверхности.

Поверхностное взаимодействие инструмента и предмета обработки выражается в том, что результат технологического процесса определяется непосредственно действием самой рабочей поверхности. Технологически эффективными являются уже не только все точки, лежащие на определенной линии, но все точки, принадлежащие рабочей поверхности инструмента. Каждая рабочая точка инструмента соответствует лишь одной точке обрабатываемой поверхности. Общим геометрическим элементом предмета обработки и инструмента в процессах III класса является уже не точка и не линия, а поверхность.

Объемное взаимодействие инструмента (обрабатывающей среды) и предмета обработки выражается в том, что результат процесса — это результат действия всего объема обрабатывающей

среды на предмет обработки. Технологически эффективными являются все точки, заключенные в данном объеме обрабатывающей среды. Каждая точка обрабатывающей среды соответствует любой точке обрабатываемого предмета. Все точки рабочего объема технологически эффективны и равноценны.

Из всех возможных операций предпочтение должно быть отдано варианту с наиболее высокой стойкостью инструмента, наименьшей чувствительностью инструмента и результатов обработки к возможным отклонениям параметров заготовки, а также с постоянством качества обработки по времени, наименьшей вероятностью выхода из строя инструмента и т. д. Стабильность выполняемой отдельной операции, как правило, тем выше, чем менее напряженными являются ее режимы и более надежен рабочий инструмент и т. п.

Характер пространственного взаимодействия инструмента и предмета обработки является качественным критерием технологических процессов. Различие основных свойств технологических процессов, а прежде всего свойств, существенных для выполнения этих процессов посредством машин, полностью определяются значениями основного критерия [5].

Основные свойства технологических процессов различных классов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные свойства технологических процессов различных классов
Table 1. The main properties of technological processes of different classes

Основное свойство	Класс процесса			
	I	II	III	IV
Характер взаимодействия инструмента и предмета обработки	Точечный	Линейный	Пространственный	Объемный
Геометрическая характеристика рабочего движения	Пространственное	Плоскостное	Прямолинейное	Произвольное
Размерность пространства перемещения	$3(x, y, z)$	$2(x, y)$	$1(x)$	—
Характерный способ осуществления рабочего движения	Участвуют инструмент и предмет обработки	Участвуют инструмент и предмет обработки или только инструмент		Рабочее движение произвольно
Величина производительности	Ограничена допустимыми значениями транспортной и технологической скоростей и ускорений	Ограничена допустимыми значениями рабочей скорости	Ограничена лишь допустимыми значениями транспортной скорости	

Оборудование, работающее по принципу I класса, имеет сложную конструкцию, низкую стойкость инструмента, а продолжительность рабочего движения велика. Все это приводит к низкой надежности оборудования. Чаще всего отказы у оборудования I класса связаны со сложной кинематикой строения.

Оборудование II класса кинематически проще. Стойкость инструмента и рабочих органов выше, однако надежность оборудования также невысока. Для большей надежности кинематически сложное оборудование I и II классов заменяют кинематически простым оборудованием III класса, обладающим высокой стойкостью инструмента и рабочих органов, что приводит к высокой стабильности и производительности оборудования. Оборудование, относящееся к IV классу, также построено кинематически просто и имеет большую стабильность, однако на производстве используется реже, чем оборудование других классов [5].

Нарушения технологического процесса на производстве подлежат учету и изучению для формирования баз данных по надежности оборудования за весь срок эксплуатации.

Оценку надежности выполняемых операций для каждого класса процессов можно получить, рассчитав технологический путь S , который представляет собой расстояние, пройденное инструментом по рабочей поверхности предмета обработки. Для каждого класса процессов технологический путь будет различным. Найдем технологический путь для четырех различных классов процессов на примере обработки объема заготовки в виде куба (рис. 1).

Объем куба с длиной ребра a будет равен

$$V_0 = a^3. \quad (1)$$

Уменьшение длины ребра после обработки поверхности учтем с помощью коэффициента β . После обработки куба объем станет следующим:

$$V_1 = a_1^3 = [a(1-2\beta)]^3. \quad (2)$$

Изменение объема можно представить как

$$\Delta V = V_0 - V_1 = a^3 [1 - (1-2\beta)^3]. \quad (3)$$

Из (3) следует, что $0 < \beta < 0,5$. Если $\beta = 0$, то $\Delta V = 0$, то есть обработка не производится. Если $\beta = 0,5$, то $\Delta V = a^3$, то есть весь элементарный объем исчезнет. Таким образом, теряется смысл обработки.

К I классу относятся процессы с точечным взаимодействием предмета и инструмента обработки. Процесс обработки может считаться точечным, если ширина кромки инструмента меньше длины ребра элементарного объема. Приняв, что элементарный объем обрабатывает инструмент с шириной кромки B , который снимает слой с поверхности толщиной H , можно найти технологический путь для I класса процессов. Ширина кромки определяется по формуле

$$B = \gamma a, \quad (4)$$

где $\gamma = 0,01 \div 0,001$ – коэффициент, представляющий отношение ширины кромки к длине ребра элементарного объема.

Толщина снимаемого слоя составит

$$H = \delta \beta a, \quad (5)$$

где $\delta \approx 1 \div 2$ – коэффициент, который равен отношению толщины удаленного слоя к толщине снимаемого слоя βa .

В рассматриваемом объеме можно выделить по две противоположных грани (см. рис. 1). Такие грани будут иметь одинаковую обработку, а следовательно, и технологический путь.

Для всех граней технологический путь будет равен

$$S_1 = S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15} + S_{16}, \quad (6)$$

где S_{11} – технологической путь для обработки первой грани, S_{12} – второй, S_{13} – третьей, S_{14} – четвертой, S_{15} – пятой, S_{16} – шестой грани.

Начнем рассмотрение с первой и третьей граней куба. Инструмент проходит по граням куба возвратно-поступательным движением путь длиной a , смещаясь на ширину B . В этом случае технологический путь для указанных граней куба составит

$$S_{11} = S_{13} = a N_B N_H, \quad (7)$$

где $N_B = \frac{a}{B}$ – число проходов инструмента по грани куба; $N_H = \frac{\beta a}{H}$ – число проходов инструмента по слоям.

Подставив N_B и N_H в (7), получаем

$$S_{11} = S_{13} = a N_B N_H = a \frac{a}{B} \frac{\beta a}{H} = a \frac{a}{\gamma a} \frac{\beta a}{\delta \beta a} = \frac{a}{\gamma \delta}. \quad (8)$$

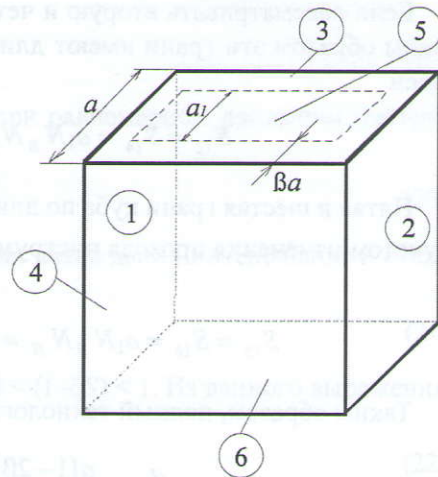


Рис. 1. Заготовка в виде куба (1–6 – первая–шестая грани куба)

Fig. 1. A blank in the form of a cube (1–6 – first–sixth faces of the cube)

Если рассматривать вторую и четвертую грани куба, то по ширине они уменьшились до a_1 , таким образом эти грани имеют длину a и ширину a_1 . В данном случае технологический путь равен

$$S_{12} = S_{14} = a_1 N_B N_H = a_1 \frac{a \beta a}{B H} = a(1-2\beta) \frac{a \beta a}{\gamma a \delta \beta a} = \frac{a(1-2\beta)}{\gamma \delta}. \quad (9)$$

Пятая и шестая грани куба по длине и ширине становятся равными a_1 . Технологический путь с учетом изменения прохода инструмента по грани куба $N_B = \frac{a_1}{B}$ имеет вид

$$S_{15} = S_{16} = a_1 N_B N_H = a_1 \frac{a_1 \beta a}{B H} = a(1-2\beta) \frac{a(1-2\beta) \beta a}{\gamma a \delta \beta a} = \frac{a(1-2\beta)^2}{\gamma \delta}. \quad (10)$$

Таким образом, полный технологический путь для процессов I класса равен

$$S_1 = 2 \frac{a}{\gamma a} + 2 \frac{a(1-2\beta)}{\gamma a} + 2 \frac{a(1-2\beta)^2}{\gamma \delta} = \frac{2a}{\gamma \delta} [1 + (1-2\beta) + (1-2\beta)^2]. \quad (11)$$

К II классу процессов относится взаимодействие по линии предмета и инструмента обработки. Примером относящегося к данному классу оборудования могут выступать гильотинные ножницы [5]. В рассматриваемом кубе линейным лезвием будет обрабатываться сразу вся длина грани. Для первых четырех граней лезвие проходит путь длиной a , а для пятой и шестой граней – a_1 . Пятая и шестая грань подвергались подрезке со всех сторон во время обработки первых четырех граней.

Технологический путь для процессов II класса имеет вид

$$S_2 = 4a + 2a_1 = 4a + 2a(1-2\beta) = 4a + 2a - 4\beta a = 6a - 4\beta a = 2a(3-2\beta). \quad (12)$$

Для процессов III класса реализуется взаимодействие по плоскости. Куб будет подвергаться последовательной ковке каждой грани [5], после чего она будет уменьшена до a_1 . Технологический путь для процессов III класса выглядит следующим образом:

$$S_3 = 6\beta a. \quad (13)$$

В процессах IV класса все грани куба одновременно подвергаются обработке, например объемной штамповке [5], в результате чего размер грани куба уменьшается до a_1 . В данном случае инструмент обработки проходит самый короткий и простой технологический путь

$$S_4 = \beta a. \quad (14)$$

Для оценки надежности рассмотренных классов обработки положим, что вероятность отказов P пропорциональна технологическому пути

$$P = \xi S, \quad (15)$$

где ξ – коэффициент пропорциональности.

Если отказы распределены по экспоненциальному закону с интенсивностью λ [1], то вероятность отказов P с учетом технологического пути S можно записать в следующем виде:

$$\lambda e^{-\lambda t} dt = \xi dS. \quad (16)$$

Проинтегрируем данное выражение:

$$\lambda \int_0^T e^{-\lambda t} dt = \xi \int_0^S dS, \quad (17)$$

где T – время на прохождение технологического пути.

В результате интегрирования получим

$$-e^{-\lambda T} + 1 = \xi S. \quad (18)$$

Выразим интенсивность из (18)

$$\lambda = -\frac{\ln(1-\xi S)}{T}. \quad (19)$$

Представим скорость обработки рабочей поверхности при равномерном движении инструмента, как

$$v = \frac{S}{T}. \quad (20)$$

Таким образом, с учетом (20) окончательная формула для нахождения интенсивности отказов следующая:

$$\lambda = -\ln(1-\xi S) \frac{S}{v}. \quad (21)$$

Отрицательные значения логарифма лежат в интервале $0 < (1-\xi S) < 1$. Из данного выражения можно найти оценку для ξ :

$$\xi < \frac{1}{S}. \quad (22)$$

Рассмотрим технологические пути для различных классов процессов и соответствующие им интенсивности отказов. При проведении расчетов сторона куба элементарного объема принималась равной $a = 0,2$ м, коэффициенты: $\beta = 0,200$; $\gamma = 0,010$; $\delta = 1$; $\xi = 0,750 \cdot 10^{-4}$. Скорости обработки были взяты из [6] для соответствующих классов процессов, выполняемых на оборудовании. Результаты расчета по формулам (11)–(14), (18) и (21) технологического пути, вероятности и интенсивности отказов для каждого класса процессов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения технологического пути и интенсивности отказов для всех классов процессов
Table 2. Calculated values of the technological path and the failure rate for all process classes

Показатель	Класс процесса			
	I	II	III	IV
Скорость обработки, м/мин	10,0	7,0	8,0	6,0
Технологический путь, м	78,400	1,040	0,240	0,040
Интенсивность отказов, ч ⁻¹	$7,706 \cdot 10^{-4}$	$1,932 \cdot 10^{-7}$	$9,000 \cdot 10^{-9}$	$3,333 \cdot 10^{-10}$
Вероятность отказов	$5,033 \cdot 10^{-4}$	$2,391 \cdot 10^{-9}$	$2,250 \cdot 10^{-11}$	$1,852 \cdot 10^{-13}$

Следует отметить, что технологический путь, интенсивность отказов и вероятность их возникновения существенно уменьшаются при переходе от процессов I класса к IV.

В графической форме результаты расчетов отражены на рис. 2, 3.

Как видно из графика на рис. 2, надежность оборудования выше для процессов IV класса и будет уменьшаться при переходе к I классу. Оборудование, выполняющее точечные операции обработки, имеет самую низкую надежность, а выполняющее объемную обработку – самую высокую надежность.

Приведенные на рис. 3 зависимости технологического пути $S(\beta)$ в единицах a от глубины обработки β свидетельствуют, что для I и II классов операций при возрастании β путь S уменьшается, а для III и IV классов – возрастает. Различие в интенсивности отказов для классов слишком велико.

Зная значения интенсивности, можно посчитать вероятность отказов для всех классов операций. С учетом формул (15) и (18) вероятность отказа при выполнении операции равна

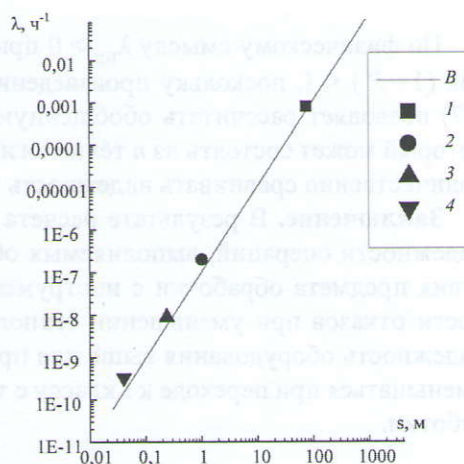


Рис. 2. Зависимость интенсивности отказов от технологического пути: B – теоретическая зависимость; 1 – I класс операций; 2 – II класс операций; 3 – III класс операций; 4 – IV класс операций

Fig. 2. Dependence of failure rate on the technological path: B – theoretical dependence; 1 – I class of operations; 2 – II class of operations; 3 – III class of operations; 4 – IV class of operations

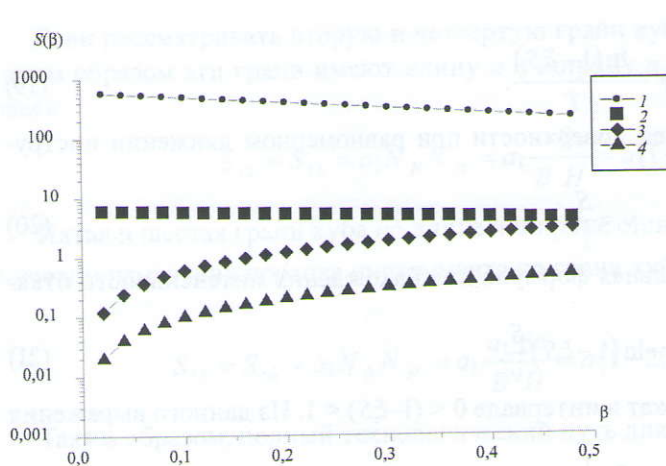


Рис. 3. Зависимость технологического пути в единицах a от глубины обработки для классов операций: 1 – I; 2 – II; 3 – III; 4 – IV

Fig. 3. Dependence of the technological path in units on the depth of processing for classes of operations: 1 – I; 2 – II; 3 – III; 4 – IV

$$p = 1 - e^{-\lambda T}. \quad (23)$$

Если рассмотреть конкретный технологический процесс, то он состоит из определенного количества операций n . В этом случае вероятность появления отказов при выполнении такого процесса будет следующей:

$$P = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (24)$$

Вероятность для всего процесса можно представить в виде

$$P = 1 - e^{-\lambda_{\text{пр}} T_{\text{пр}}}, \quad (25)$$

где $T_{\text{пр}}$ – суммарное время на выполнение данного процесса, которое определяется выражением $T_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n T_i$; $\lambda_{\text{пр}}$ – обобщенная интенсивность отказов для всего процесса.

Преобразуем и прологарифмируем (25):

$$-\lambda_{\text{пр}} T_{\text{пр}} = \ln(1 - P). \quad (26)$$

Из (26) выразим $\lambda_{\text{пр}}$ и учтем в (24). Окончательное выражение для $\lambda_{\text{пр}}$ примет вид

$$\lambda_{\text{пр}} = -\frac{\ln(1 - P)}{T_{\text{пр}}} = -\frac{\ln\left(1 - \prod_{i=1}^n p_i\right)}{\sum_{i=1}^n T_i}. \quad (27)$$

По физическому смыслу $\lambda_{\text{пр}} > 0$ при $P < 1$. Из формулы (27) видно, что это справедливо, так как $(1 - P) < 1$, поскольку произведение вероятностей также будет меньше единицы. Формула (27) позволяет рассчитать обобщенную интенсивность отказов для всего процесса обработки, который может состоять из n технологических операций разных классов. Такой расчет позволяет количественно сравнивать надежность технологических процессов при их проектировании.

Заключение. В результате расчета технологического пути при обработке получена оценка надежности операций, выполняемых оборудованием для каждого класса процессов взаимодействия предмета обработки с инструментом. Полученная закономерность изменения интенсивности отказов при уменьшении технологического пути обработки свидетельствует о том, что надежность оборудования выше для процессов IV класса с объемным взаимодействием и будет уменьшаться при переходе к I классу с точечным взаимодействием инструмента с предметом обработки.

Список использованных источников

1. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
2. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1986. – 312 с.
3. Теоретическая оценка надежности печатного оборудования на стадиях его жизненного цикла / М. И. Кулак [и др.] // Труды БГТУ. Изд. дело и полиграфия. – 2012. – № 9. – С. 27–32.
4. Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин / М. Л. Хейфец [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 3. – С. 10–22.

5. Кошкин, Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии / Л. Н. Кошкин. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 496 с.

References

1. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Mathematical methods in reliability theory*. Moscow, Science Publ., 1965. 524 p. (in Russian).
2. Bolotin V. V. *Forecasting the resource of machines and structures*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 312 p. (in Russian).
3. Kulak M. I., Trusevich N.E., Sakulevich T. A., Kharitonchik I. V. Theoretical evaluation of reliability of printing equipment at the stages of its life cycle. *Trudy BGTU. Izdatel'skoye delo i poligrafiya* [Proceedings of BSTU. Printing and Publishing], 2012, no. 9, pp. 27–32 (in Russian).
4. Kheyfets M. L., Vasil'ev A. S., Kondakov A. I., Tanovich L. Technological management of the inheritance of operational parameters of the quality of machine parts. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 3, pp. 10–22 (in Russian).
5. Koshkin L. N. *Rotary and rotary-conveyor lines*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 320 p. (in Russian).
6. Kosilova A. G., Meshcheryakova R. K. *Handbook of the technologist-machine builder. Vol. 2*. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2001. 496 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кулак Михаил Иосифович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой полиграфических производств, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulak_mi@tut.by

Голуб Надежда Сергеевна – аспирант кафедры полиграфических производств, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: golubok.358-01@mail.ru

Information about the authors

Mihail I. Kulak – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Printing Technologies, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulak-mi@tut.by

Nadzeja S. Golub – Graduate Student of the Department of Printing Technologies, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: golubok.358-01@mail.ru