

УДК 621.9–219.1–752
DOI: 10.12737/21234

**С.М. Братан, д.т.н.,
Е.А. Владецкая, аспирант**
(ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Россия)
E-mail: serg.bratan@gmail.com

Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка

На основе положений теории массового обслуживания предложен метод оценки надежности виброизолирующего устройства станка с использованием размеченного графа состояний с учетом потоков отказов и восстановлений. Метод позволяет с помощью машинного эксперимента определить эксплуатационную надежность устройства и выявить наименее надежные подсистемы и элементы, а также целесообразность их параметрической оптимизации.

Ключевые слова: виброизолирующее устройство станка; надежность; интенсивность потока отказов; поток восстановления; уравнения финальных вероятностей.

**S.M. Bratan, D.Eng.,
E.A. Vladetskaya, Post graduate student**
(FSBEI HE Sevastopol State University, Russia)

Investigation of vibroisolating device reliability in grinding machine

For the search of rational engineering solutions on the design of vibroisolating devices of a machine functioning under conditions of a floating shop there is used a method of a morphological analysis. The undertakings carried out allowed solving a problem at the level of a structural arrangement optimization and parametric synthesis and creating new designs of a vibroisolating support and a vibroisolating device. On the basis of the regulations of a mass service theory there is offered a method for the operation reliability estimation of a machine vibroisolating device with the use of a graduated graph of states taking into account failure and restoration flows. The state of the system is determined by a set of equations of final likelihoods. A machine experiment has shown maintainability high enough of a vibroisolating device (more than 96 % of its life the device is in its operational status, and about 4% - in the repair (restoration) state of its subsystems). To the least reliable subsystem it should be related a drive (failure probability – 2.11%), further – vibro-isolator (failure probability – 1%), then – a body – (0.52%) and a fastening device (0.26%). The method allows defining device maintainability with the aid of a machine experiment and revealing least reliable subsystems and elements and also an expediency of their parametrical optimization.

Keywords: machine vibroisolating device; reliability; failure flow rate; restoration flow; equation of final likelihood.

Для поиска рациональных технических решений по конструкции виброизолирующих устройств станка, работающего в условиях плавучей мастерской, использован метод морфологического анализа, достаточно полно разработанный для решения технических задач, в частности проектирования станков, их узлов и механизмов [1].

Проведенные мероприятия позволили решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации [2]. Этап параметрического синтеза и проведение дополни-

тельных теоретических и практических исследований реальных конструкций виброизолирующих устройств, выполненные в Севастопольском государственном университете, позволили создать новые конструкции виброизолирующей опоры (рис. 1) [3] и виброизолирующего устройства металлорежущего станка плавучей мастерской (рис. 2) [4].

Для оценки надежности вариантов выбранных структур необходимо рассмотреть особенности возникновения отказов функционирования, то есть эксплуатационную надеж-

ность системы виброизолирующего устройства (ВУ) (рис. 3).



Рис. 1. Виброизолирующие опоры новой конструкции

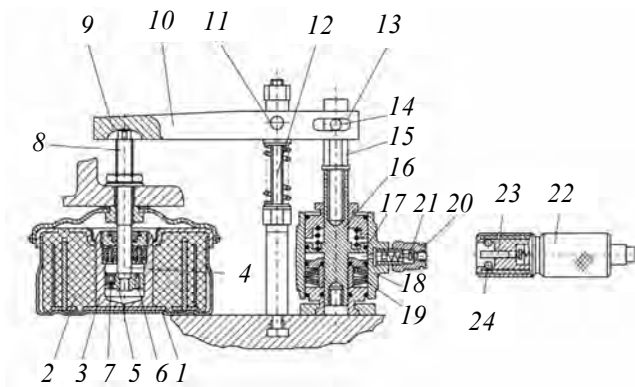


Рис. 2. Общий вид виброизолирующего устройства:
 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарик

Каждый элемент подсистемы ВУ может иметь различные интенсивности восстановления μ , а также и различные интенсивности отказов λ , т.е. разную надежность. При этом сложный элемент (подсистема) при одинаковом λ может иметь меньшее значение μ (меньшую надежность). Либо при одинаковом μ большее значение λ , чем менее сложный элемент. Это необходимо учесть при выборе критериев оценки эффективности структур ВУ.

Рассматривая виброизолирующее устройство как дискретную систему, примем, что

элементы (подсистемы) отказывают независимо друг от друга, причем каждый элемент после отказа восстанавливается. Будем считать, что исходные свойства подсистемы восстанавливаются полностью, а работа, отказы и восстановления одной подсистемы никак не влияют на надежность других.

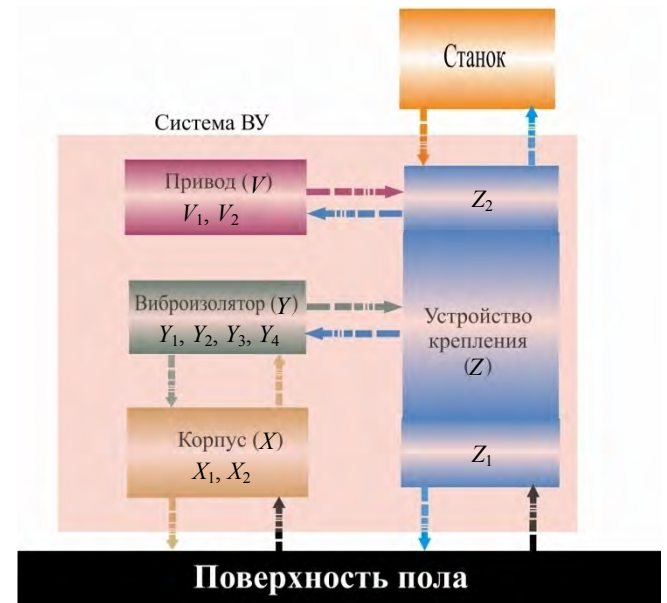


Рис. 3. Структурная схема системы виброизолирующего устройства

Моменты отказа каждой подсистемы образуют процесс восстановления, причем в силу наших предположений, эти процессы независимы. Обозначим через $F_k(t)$ закон распределения времени жизни k -й подсистемы (элемента). Предполагаем, что эти законы имеют непрерывную плотность $f_k(t)$ и существуют среднее время жизни подсистемы (элемента) T_k и его дисперсия σ_k^2 .

Поскольку подсистемы в системе ВУ с точки зрения надежности соединены последовательно (рис. 4), то отказ любой подсистемы вызывает отказ всей системы. Появление отказов на одном участке времени не меняет вероятности появления какого-либо числа отказов на другом участке, не пересекающимся с первым.

Из этих физических соображений следует, что при сделанных выше предположениях в потоке отказов системы ВУ должно отсутствовать последствие. Кроме того, предположим, что законы распределения $F_k(t)$ имеют непрерывные плотности. Отсюда следует, что функция $H(t)$ – среднее число отказов – непрерывна и поток отказов системы ВУ является

ся ординарным, т.е. вероятность одновременного появления двух отказов ничтожно мала. С учетом приведенных доводов, рассмотрена система ВУ как физически дискретная система, которая может находиться в состояниях S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 .

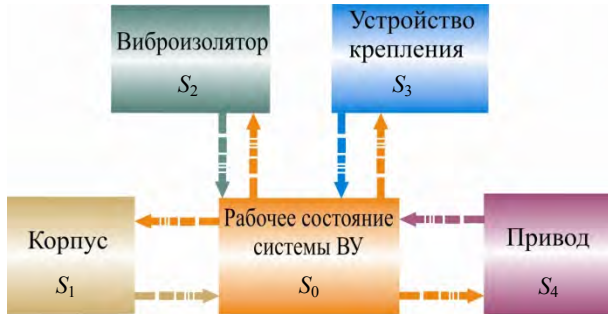


Рис. 4. Размеченный граф состояний системы виброизолирующего устройства (ВУ) с учетом отказов ее подсистем

Состояние S_0 характеризует нормальное функционирование виброизолирующего устройства (ВУ) при отсутствии отказов.

В состоянии S_1 требуется ремонт вышедшего из строя корпуса вследствие потока отказов его функционирования с интенсивностью λ_1 . В этом случае $\lambda_1 = 1/\bar{T}_k$, где \bar{T}_k – среднее время между двумя отказами функционирования корпуса, ч.

Состояние S_2 характеризуется выходом из строя виброизолятора из-за потоков отказов с интенсивностью λ_2 . При этом $\lambda_2 = 1/\bar{T}_B$, где \bar{T}_B – среднее время между двумя отказами функционирования виброизолятора, ч.

В состоянии S_3 требуется ремонт или замена вышедшего из строя устройства крепления вследствие потока отказов с интенсивностью λ_3 . В этом случае $\lambda_3 = 1/\bar{T}_y$, где \bar{T}_y – среднее время между двумя отказами функционирования устройства крепления, ч.

В состоянии S_4 требуется ремонт вышедшего из строя привода вследствие потока отказов с интенсивностью λ_4 . В этом случае $\lambda_4 = 1/\bar{T}_\Pi$, где \bar{T}_Π – среднее время между двумя отказами функционирования привода, ч.

Величины $\bar{T}_k, \bar{T}_y, \bar{T}_B, \bar{T}_\Pi$ определяются

по общей формуле $\bar{T} = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{m}$, где t_j – интервал между $(j - 1)$ -м и j -м отказами; m – число отка-

зов функционирования соответствующей подсистемы виброизолирующего устройства.

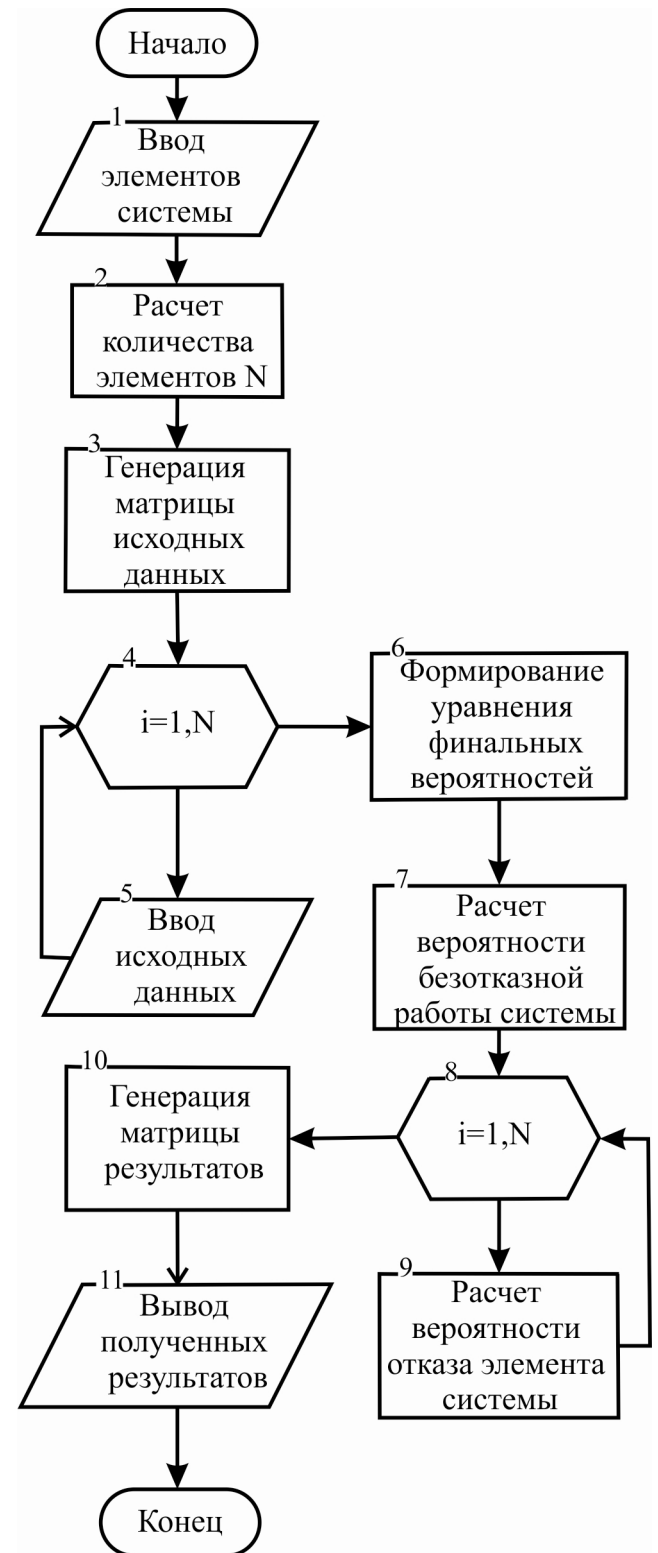


Рис. 5. Графический алгоритм расчета надежности системы ВУ

Каждая подсистема ВУ подвергается восстановлению после отказа. Интенсивность восстановления соответственно для каждой подсистемы обозначим $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, считая при этом, что время восстановления, являю-

щиеся случайной величиной, подчиняется закону Пуассона:

$$\mu_1 = \frac{1}{\bar{T}_{\text{ВК}}}; \quad \mu_2 = \frac{1}{\bar{T}_{\text{ВВ}}}; \quad \mu_3 = \frac{1}{\bar{T}_{\text{ВУ}}};$$

$$\mu_4 = \frac{1}{\bar{T}_{\text{ВП}}},$$

где $\bar{T}_{\text{ВК}}$ – среднее время восстановления (ремонта) корпуса, ч; $\bar{T}_{\text{ВВ}}$ – среднее время восстановления (замены) виброизолятора, ч; $\bar{T}_{\text{ВУ}}$ – среднее время восстановления (замены) устройства крепления, ч; $\bar{T}_{\text{ВП}}$ – среднее время восстановления (ремонта) привода, ч.

Для описания размеченного графа состояний системы виброизолирующего устройства (рис. 5) обозначим вероятность ее нахождения в каждом из вышеуказанных состояний соответственно P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 .

P_0 – вероятность нормальной работы ВУ при отсутствии отказов, $P_0 = P(S_0)$; P_1 – вероятность отказа подсистемы корпуса, $P_1 = P(S_1)$; P_2 – вероятность отказа подсистемы виброизолятора, $P_2 = P(S_2)$; P_3 – вероятность отказа подсистемы устройства уплотнения, $P_3 = P(S_3)$; P_4 – вероятность отказа подсистемы привода, $P_4 = P(S_4)$.

Состояние системы определяется совокупностью уравнений финальных вероятностей:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_1\mu_1 + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 + P_4\mu_4; \\ P_1\mu_1 = P_0\lambda_1; \\ P_2\mu_2 = P_0\lambda_2; \\ P_3\mu_3 = P_0\lambda_3; \\ P_4\mu_4 = P_0\lambda_4. \end{cases} \quad (1)$$

Система (1) решается с помощью условия нормирования:

$$\sum_{i=0}^4 P_i = 1.$$

В уравнениях интенсивности λ – характеризуют входящий поток – поток отказов, интенсивности μ – выходящий поток – поток восстановлений.

Из (1) определяем финальные вероятности:

$$\begin{cases} P_0 = (1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2 + \lambda_3/\mu_3 + \lambda_4/\mu_4)^{-1}; \\ P_1 = P_0\lambda_1/\mu_1; \\ P_2 = P_0\lambda_2/\mu_2; \\ P_3 = P_0\lambda_3/\mu_3; \\ P_4 = P_0\lambda_4/\mu_4. \end{cases}$$

Решение полученной системы уравнений и результаты расчетов позволят выявить наименее надежную из подсистем виброизолирующего устройства, определив вероятности их отказов.

Блок-схема программы расчета надежности рациональных вариантов систем виброизолирующих устройств включает следующие основные этапы:

- 1) ввод названий элементов базовой системы;
- 2) расчет количества элементов;
- 3) генерация матрицы исходных данных;
- 4) заполнение матрицы исходными данными;
- 5) формирование уравнения финальных вероятностей;
- 6) расчет вероятности безотказной работы системы;
- 7) расчет вероятностей отказов элементов системы;
- 8) генерация матрицы результатов;
- 9) вывод результатов моделирования.

Рассмотрим каждый пункт словесного алгоритма. Первый пункт предполагает ввод названий элемента системы пользователем для идентификации их в дальнейшей работе программы и при выводе результатов. Для этого будет использоваться отдельное поле, в которое непосредственно вводится название элемента и список, в котором будут отображаться уже введенные подсистемы или элементы.

Во втором пункте после окончания ввода названий элементов, производится расчет количества элементов в заданной системе. Эта информация служит для создания дальнейшего интерфейса программы (появления необходимого количества полей ввода для параметров элементов), так и для расчетов финальных вероятностей.

В третьем пункте производится генерация матрицы исходных данных, т.е. создается матрица с пустыми значениями потоков отказов и восстановлений для каждого элемента, присутствующего в системе. В соответствии с этой матрицей на рабочем поле программы создается необходимое количество полей ввода для таких данных, как потоки отказов и восстановлений соответствующих элементов системы. В ходе процесса, описанного в четвертом пункте, пользователь вводит данные о потоках отказов и восстановлений в поля ввода, присутствующие на рабочем поле программы. Эти данные автоматически заносятся в матрицу исходных данных.

Пятый пункт предполагает составление программой системы финальных уравнений для заданной системы. Подробный алгоритм этой операции рассмотрен в [5].

В пунктах шесть и семь решается система финальных уравнений. Для начала вычисляется вероятность безотказной работы P_0 . Затем вычисляются вероятности отказов каждого элемента системы $P_1...P_n$. Пункт восемь отвечает за создание матрицы результатов и запись полученных результатов в соответствующие ячейки этой матрицы.

Вывод результатов моделирования осуществляет пункт девять. Вывод результатов предполагается реализовать в текстовом и графическом виде. Текстовый вид представляет собой список с указанием элемента и вероятностью его отказа, в конце выводится вероятность безотказной работы системы. Графический вид выполняется в виде диаграммы, по оси X расположены элементы системы, по оси Y – вероятности отказов этих элементов. Для удобства чтения данной диаграммы вероятность безотказной работы не выводится, т.к. является несоизмеримо большей по величине.

Графический алгоритм программы представлен на рис. 6. На рисунке представлен пример работы предлагаемой программы для

вычисления вероятностей безотказной работы системы виброизолирующего устройства, а также отказов его подсистем, описанных в работе [6].

Эксплуатационные данные по параметрам потоков отказов и восстановления подсистем виброизолирующего устройства, а также результаты моделирования приведены в табл. 1.

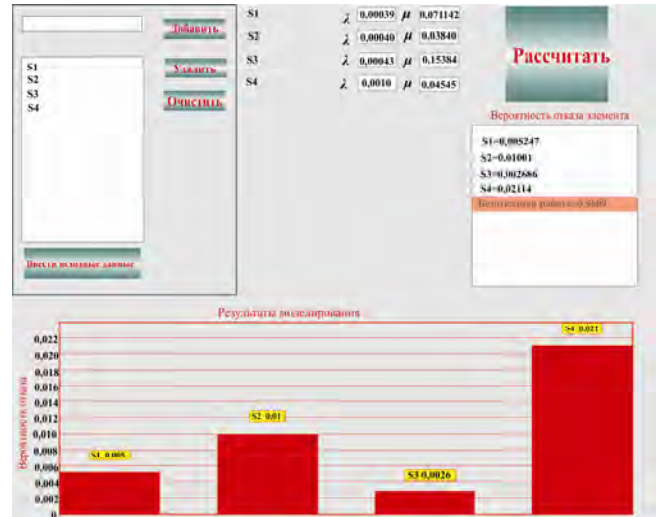


Рис. 6. Программа для расчета надежности подсистем виброизолирующего устройства

1. Результаты расчетов надежности подсистем виброизолирующего устройства

Подсистема	Интенсивность потока отказов, ч ⁻¹	Интенсивность потока восстановлений, ч ⁻¹	Вероятность отказа
Корпус	0,00039	0,07142	0,0052
Виброизолятор	0,00040	0,03840	0,0100
Устройство крепления	0,00043	0,15384	0,0026
Привод	0,00100	0,04545	0,0211
Вероятность безотказной работы системы ВУ			0,9609

Машинный эксперимент показал достаточно высокую эксплуатационную надежность виброизолирующего устройства ($P_0 = 0,9609$), т.е. более 96 % своего ресурса устройство находится в рабочем состоянии, а около 4 % – в состоянии ремонта (восстановления) его подсистем. К наименее надежной подсистеме следует отнести привод (вероятность отказа $P_4 = 0,0211$, т.е. 2,11 %), далее – виброизолятор (вероятность отказа $P_2 = 0,01$, т.е. 1 %), затем корпус ($P_1 = 0,0052$, т.е. 0,52 %) и устройство крепления (вероятность отказа $P_3 = 0,0026$, т.е. 0,26 %). Выявленные наиме-

нее надежные элементы и подсистемы нуждаются в усовершенствованиях конструкторско-технологического характера – путем оптимизации конструкции и технологических мероприятий, которые могут привести к существенному увеличению сроков службы изделия.

Для продолжения машинного эксперимента необходимо получить эксплуатационные данные для новых вариантов подсистем и системы и повторить процесс расчетов, начиная с первого этапа. Однако в данном случае подсистем и элементов, имеющих надежность,

существенно влияющую на вероятность безотказной работы системы, не выявлено, так как даже наименее надежный элемент – привод (вероятность отказа 2,11 %) не оказывает существенного влияния на работоспособность системы и поэтому дальнейшей оптимизации с точки зрения повышения надежности на данном этапе не требуется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, Ю.Н. Новоселов, Ю.К., Луцив, И.В. Теория технических систем. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – 252 с.
2. Владецкая, Е.А. Оптимизация структуры виброзащитных систем шлифовального станка на основе морфологического анализа / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Вісник СевНТУ. – Вип.140: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – С.14–20.
3. Пат. України 36389. Віброізолююча опора металорізального верстата /А.О. Харченко, К.О. Владецька, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацький. 2008, Бюл. №20.
4. Пат. України 51621. Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні / А.О. Харченко, К.О. Владецька, С.М. Братан, Д.О. Владецький, 2010, Бюл. №14.
5. Владецкая, Е.А., Братан, С.М. Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавучей мастерской // Перспективы науки – 2016: Сб. докладов III Международного конкурса научно-исследовательских работ (29 апреля 2016 г.). Том III (Естественные и технические науки). – Казань: ООО «Рокета Союз», 2016. – С. 247–257.

6. Владецкая, Е.А., Братан, С.М., Харченко, А.О., Владецкий, Д.О. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №6 (314). – С.88–103.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Yu.N. Novosyolov, Yu.K., Lutsiv, I.V. *Theory of Engineering Systems*. – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2010. – pp. 252.
2. Vladetskaya, E.A. Optimization of grinder vibroprotective system structure based on morphological analysis / E.A. Vladetskaya, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko // Bulletin of SevNTU. – Issue.140: *Mechanical Engineering and Transport: Proceedings of Science*. – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2013. – pp.14–20.
3. Pat. Ukraine 36389. *Vibroprotective Support of Machine-tool* /A.O. Kharchenko, K.O. Vladetskaya, S.M. Bratan, Yu.L. Rapatsky. 2008, Bull. №20.
4. Pat. Ukraine 51621. *Vibro-protective Support of Machine-tool of Floating repair Shop* / A.O. Kharchenko, K.O. Vladetskaya, S.M. Bratan, D.O. Vladetsky, 2010, Bull. №14.
5. Vladetskaya, E.A., Bratan, S.M. Grinding quality increase under conditions of floating repair shop // *Science Prospects – 2016: Proceedings of the III-d Inter. Competition of Sc. Works* (April 29, 2016). Vol. III (Natural and Engineering Sciences). – Kazan: “Rocket “Soyuz”, 2016. – pp. 247–257.
6. Vladetskaya, E.A., Bratan, S.M., Kharchenko, A.O., Vladetsky, D.O. Grinding quality support by outer disturbance decrease under conditions of floating repair shop // *Fundamental and Applied Problems of Techniques*. – 2015. – №6 (314). – pp.88–103.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандошко

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научноёмкие технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru