

*На правах рукописи*



**Бутримова Елена Владимировна**

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре “Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) “Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, г.Москва.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **ШВАРЦБУРГ Леонид Эфраимович**, заведующий кафедрой “Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности” ФГБОУ ВПО “Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, г.Москва.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **ВЕСЕЛОВ Олег Вениаминович**, профессор кафедры “Мехатроника и электронные системы автомобилей” ФГБОУ ВПО “Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых” (ВлГУ), г.Владимир;

кандидат технических наук, доцент **КОРЬЯЧЕВ Анатолий Николаевич**, доцент кафедры “Технология машиностроения” ФГБОУ ВПО “Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)”, г.Москва.

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт конструкторско-технологической информатики” Российской академии наук (ИКТИ РАН), г.Москва.

Защита состоится “6” ноября 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.01 при ВлГУ по адресу: г.Владимир, ул. Горького, д. 87, ауд. 335-1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ по адресу: г.Владимир, ул. Горького, д. 87.

Автореферат разослан “1” октября 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, направлять по адресу совета университета: 600000, г.Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.01.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., доц.



Давыдов Н.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Развитие рыночных отношений и связанное с этим усиление конкурентной борьбы предъявляют все более высокие требования к качеству машиностроительной продукции и технологических процессов, реализуемых на нем. Одним из важнейших показателей качества, сопровождающих любой технологический процесс, является наличие вибраций в подвижных элементах оборудования и вызываемый ими шум. Важность этого показателя качества дополнительно подчеркивается тем, что вибрация не только ухудшает качество продукции, но и оказывает существенное негативное воздействие на окружающую среду и человека, снижает комфортность труда.

Одним из основных направлений снижения вибраций является их устранение непосредственно в источниках, которыми являются элементы кинематической цепи станка. По этой причине существенное значение приобретает задача прогнозирования вибраций, позволяющая минимизировать вибрации на этапах разработки оборудования и технологических процессов. Эта задача не может быть решена без применения современных информационных технологий, позволяющих не только дать объективный прогноз распространения вибраций, но и существенно упростить аппарат этого прогноза. Одним из возможных путей упрощения аппарата для прогнозирования распространения вибраций является применение линейных моделей для прогноза их распространения на ограниченных расстояниях. Поэтому работа, направленная на прогнозирование вибраций на основе линейного моделирования, является актуальной.

Вопросам исследования вибраций и моделирования процессов посвящены работы Б.М. Базрова, Б.С. Балакшина, В.В. Бушуева, Дж.Х. Ваня, В.Л. Вейца, В.С. Гановски, В.И. Горюшкина, С.И. Досько, Р.С. Канзафарова, С.С. Кедрова, В.А. Кудинова, Н.Г. Латышева, Е.Н. Талицкого, К.В. Фролова и других. Проблемы автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности исследованы в трудах Ю.Л. Арзуманова, О.В. Веселова, В.А. Гречишникова, В.И. Денисенко, И.Н. Егорова, Н.И. Иванова, В.Ф. Коростелева, Р.И. Макарова, В.Г. Митрофанова, Ю.М. Соломенцева, А.Г. Схиртладзе, Л.Э. Шварцбурга и др.

**Объект исследования** – технологические процессы промышленного машиностроительного производства.

**Предмет исследования** – процессы обеспечения качества продукции и комфортности труда в эргатических системах управления производством.

**Цель работы** – повышение эффективности управления технологическими процессами на основе прогнозирования распространения вибраций в технологической среде при создании и эксплуатации технологического оборудования для обработки изделий.

Поставленная в работе цель достигнута за счет **решения следующих задач:**

1. Проведен анализ источников вибраций в технологическом оборудовании;
2. Разработаны линейные модели, описывающие распространение вибраций в технологическом оборудовании и на опорных плоскостях;
3. Разработаны алгоритмы прогнозирования вибраций в технологической среде;
4. Разработаны и адаптированы программы реализации алгоритмов прогнозирования, позволяющие автоматизировать процесс прогнозирования вибраций;
5. Оценена достоверность линейных моделей, алгоритмов прогнозирования и программ.

**Методы исследования.** Исследования проводились с применением современных компьютерных технологий, теории автоматического управления, теории моделирования, теории вероятностей и математической статистики, технологии машиностроения, теории эксперимента, инженерной экологии, программирования.

**Научная новизна** работы заключается в:

1. установлении взаимосвязи между параметрами, характеризующими вибрацию, и изменением их значений при распространении в среде, позволяющие оценить величины вибраций по результатам единичных измерений;
2. разработке линейных моделей распространения вибраций в элементах технологического оборудования и на опорных плоскостях, позволяющих осуществить прогнозирование вибраций в технологической среде по результатам единичных измерений;
3. алгоритмах реализации разработанных моделей и их экспериментальном обосновании, дающих возможность автоматизировать процесс про-

гнозирования вибраций в технологической среде на основе линейного моделирования;

4. разработанных программам реализации алгоритмов прогнозирования вибраций, позволяющих спрогнозировать распространение вибраций и обеспечить их визуализацию.

**Практическая значимость** работы заключается:

1. в методике прогнозирования вибраций в технологической среде по результатам единичных измерений;

2. в использовании и адаптации программного продукта MS Visio и программы, применяемой для прогнозирования и визуализации шума, для прогнозирования распространения вибраций в технологической среде.

**Реализация работы:**

1. Результаты работы были использованы в исследованиях, проводимых в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” по проекту “Создание и исследование автоматизированных энергосберегающих систем для металлорежущих станков, адаптированных к машиностроительным технологическим процессам формообразования” (госконтракт № 16.740.11.0533 от 16.05.2011).

2. Результаты работы использованы в ОАО “Станкоагрегат” при оценке конструкции и установке опор металлорежущих станков при их монтаже, а также для оценки распространения вибраций на опорные плоскости площадей цеха с целью проверки правильности размещения соседнего оборудования (металлорежущие станки и места оперативного контроля качества).

3. Результаты работы использованы в ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН” в учебном процессе по направлениям 220700 “Автоматизация технологических процессов и производств”, 280700 “Техносферная безопасность”.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, общероссийских и вузовских научно-технических конференциях: Международных конференциях “Производство. Технология. Экология” (ПРОТЭК); XXII Международной Инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов “Будущее машиностроения России” (МИКМУС-2010); III Научно-образовательной конференции “Машиностроение – традиции и инновации” (МТИ-2010); Всероссийской молодежной конференции “Автоматизация и информационные технологии” (АИТ-2012) и на заседании кафедры “Инже-

нерная экология и безопасность жизнедеятельности” ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН”.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Математический подход к прогнозированию вибраций в технологической среде, решающий задачу создания эргатических систем управления технологическими процессами и обеспечивая достоверность прогнозируемых результатов.
2. Линейные математические модели, описывающие зависимость уровня вибрации и расстояния от источника в технологической среде.
3. Алгоритмы реализации линейных моделей, обеспечивающие автоматизацию процесса прогнозирования вибраций в технологической среде по результатам единичных измерений.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе три статьи в издании, включенном ВАК в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 147 наименований и приложения. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста и содержит 31 рисунок и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, отмечена ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования.

В **первой главе** “Вибрации – один из основных показателей качества технологических процессов” проанализированы источники возникновения вибраций в металлорежущих станках, проведен их качественный и количественный анализ, показано влияние вибраций на показатели качества технологических процессов и сформулированы основные цели исследования.

Исследованию вибраций при реализации машиностроительных технологических процессов формообразования, их влияния на показатели качества этих процессов посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых. В этих работах показано, что вибрации, их характер и величина, связаны не только с конструкцией металлорежущих станков (де-

формаций упругой системы станка, геометрической и кинематической точностью станка, дисбалансом вращающихся деталей и др.), качеством заготовки (колебания припуска, неоднородностью материала и др.) и инструмента, но и с режимами движения (установившееся, переходный, установочный).

Следует также отметить, что вибрация никогда не распределена равномерно по всем элементам станка, что необходимо также учитывать, т.к. точка с максимальным уровнем вибрации не обязательно располагается рядом с источником вибрации. Причиной этого является соотношение собственных частот станка и частот вибраций в источнике.

В технической литературе показано, что снижение вибраций ведется по трем основным направлениям:

1. На этапе проектирования – осуществляется соответствующим выбором инерционных и жесткостных параметров станков, уменьшающих опасность возникновения резонансов; возможным уменьшением сил; мерами по уравниванию вращающихся частей и т.п.;
2. На этапе изготовления – это строгое выполнение технологических требований при изготовлении кинематических пар, тщательная балансировка вращающихся частей;
3. На этапе эксплуатации – выбор рациональных режимов эксплуатации станков.

В работе представлены также методы снижения вибраций на каждом из этих направлений и проанализировано воздействие вибраций как на технологическое оборудование, так и на функциональное и физиологическое состояние работника, обоснована важность прогнозирования распространения вибраций при создании оборудования.

В результате проведенного анализа были сформулированы цели и задачи исследования, направленные на автоматизацию прогнозирования реального распространения вибраций в производственной среде.

**Вторая глава** “Возможность применения линейного моделирования для анализа распространения вибрации” посвящена теоретическому анализу возможности применения линейного закона для прогнозирования распространения вибрации.

В работе рассмотрены возможности экспоненциального, степенного, экспоненциально-степенного и линейного описания распространения вибрации:

$$V = c \cdot e^{(a_1 \cdot R + a_2 \cdot n)} \text{ - экспоненциальный закон;}$$

$V = c \cdot R^{a_1} \cdot n^{a_2}$  - степенной закон;

$V = c \cdot R^{a_1} \cdot n^{a_2} \cdot e^{(b_1 \cdot R + b_2 \cdot n)}$  - экспоненциально-степенной закон;

$V = c + a_1 \cdot R + a_2 \cdot n$  - линейный закон;

где  $V$  – уровень вибрации, дБ;

$c, a_1, a_2, b_1, b_2$  – коэффициенты математической модели;

$R$  – расстояние от источника вибрации, м;

$n$  – частота вращения шпинделя, об/мин.

Для каждого из этих законов были получены значения коэффициентов.

Так, например, для линейного закона:

$$c = \frac{\left( \sum_{k=1}^p V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 + \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k V_k + \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k V_k - \sum_{k=1}^p V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k V_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 \right)}{\left( p \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 + \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k + \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k - p \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 \right)}$$

$$a_1 = \frac{\left( p \cdot \sum_{k=1}^p R_k V_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 + \sum_{k=1}^p V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k + \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k V_k - \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k V_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k - p \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k V_k - \sum_{k=1}^p V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 \right)}{\left( p \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 + \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k + \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k - p \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 \right)}$$

$$a_2 = \frac{\left( p \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k V_k + \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k V_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k + \sum_{k=1}^p V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^p V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k - p \cdot \sum_{k=1}^p R_k V_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k V_k \right)}{\left( p \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 + \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k + \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^p n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k^2 \cdot \sum_{k=1}^p n_k - p \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k n_k - \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p R_k \cdot \sum_{k=1}^p n_k^2 \right)}$$

где  $p$  – количество измерений;  $k$  – номер измерения.



Как показал анализ полученных значений, коэффициенты наиболее простого их изображения соответствуют именно линейному описанию, т.к. во все остальные описания входит логарифмическая функция.

На основании этого, для прогнозирования распространения вибрации был выбран метод линейного моделирования.

В третьей главе “Реализация линейного моделирования для прогнозирования вибрации в технологической среде” экспериментально показана возможность реализации линейной модели для прогнозирования вибраций в технологическом оборудовании, разработан программный продукт для прогнозирования вибраций в любой точке оборудования, доказана его достоверность.

Для экспериментального подтверждения исследования проводились при токарной обработке. Контрольные точки измерения вибрации располагались на направляющей станка, расстояния по 0,4 м отсчитывались от коробки скоростей. Исследования проводились при разных скоростях вращения шпинделя, в качестве измеряемого параметра был взят уровень виброскорости. Результаты исследований при реализации линейной модели представлены на рисунке 1.

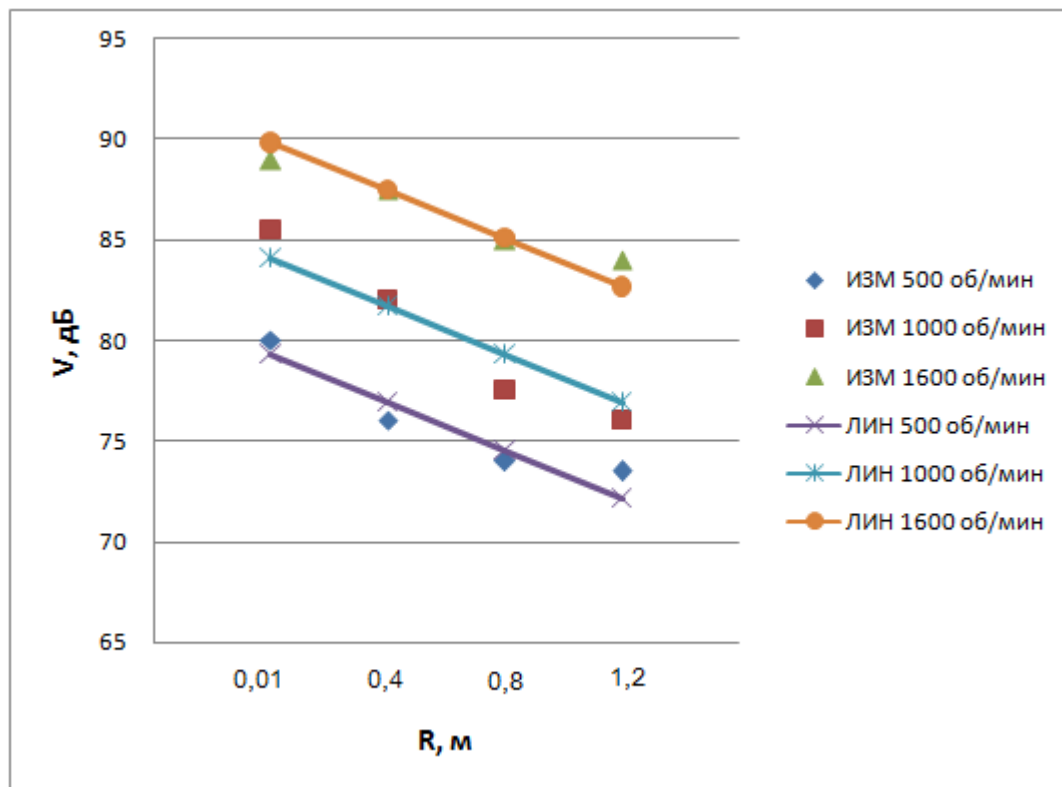


Рисунок 1 – Графическое изображение линейной модели и действительных значений

При этом сопоставлены результаты прогнозирования уровня виброскорости с реальными значениями в этих же точках. В таблице 1 показаны значения уровней виброскорости и отклонения от измеренных значений при моделировании по экспоненциальному, степенному, экспоненциально-степенному и линейному закону.

Таблица 1 – Сравнение значений уровней виброскорости в контрольных точках

n, об/мин	R, м	V <sub>изм</sub> , дБ	Экспоненциальный закон		Степенной закон		Экспон.- степенной закон		Линейный закон	
			V <sub>ЭКСП</sub> , дБ	Δ <sub>ЭКСП</sub> , дБ	V <sub>СТЕП</sub> , дБ	Δ <sub>СТЕП</sub> , дБ	V <sub>Э-С</sub> , дБ	Δ <sub>Э-С</sub> , дБ	V <sub>ЛИН</sub> , дБ	Δ <sub>ЛИН</sub> , дБ
500	0,01	80,0	79,17	- 0,83	79,55	- 0,45	79,70	- 0,30	79,31	- 0,69
	0,4	76,0	76,89	0,89	74,80	- 1,20	76,47	0,47	76,95	0,95
	0,8	74,0	74,62	0,62	73,94	- 0,06	74,55	0,55	74,54	0,54
	1,2	73,5	72,42	- 1,08	73,44	- 0,06	72,79	- 0,71	72,12	- 1,38
1000	0,01	85,5	84,00	- 1,50	85,81	0,31	84,25	- 1,25	84,09	- 1,41
	0,4	82,0	81,58	- 0,42	80,69	- 1,31	80,84	- 1,16	81,74	- 0,26
	0,8	77,5	79,17	1,67	79,76	2,26	78,80	1, 30	79,32	1,82
	1,2	76,0	76,83	0,83	79,22	3,22	76,94	0,94	76,91	0,91
1600	0,01	89,0	90,18	1,18	90,34	1,34	90,76	1,76	89,83	0,83
	0,4	87,5	87,58	0,08	84,94	- 2,56	87,08	- 0,42	87,48	- 0,02
	0,8	85,0	84,99	- 0,01	83,96	- 1,04	84,89	- 0,11	85,06	0,06
	1,2	84,0	82,48	- 1,52	83,39	- 0,61	82,88	- 1,12	82,65	- 1,35

Как видно из таблицы 1, при моделировании распространения вибрации по линейному закону максимальное отклонение составляет 1,8 дБ, т.е. погрешность не превышает 2,5 %. Таким образом, линейное моделирование как наиболее простое позволяет прогнозировать распространение вибрации в оборудовании.

Для реализации линейного прогнозирования была разработана программа в среде визуального программирования Microsoft Visual Basic, алгоритм которой представлен на рисунке 2.

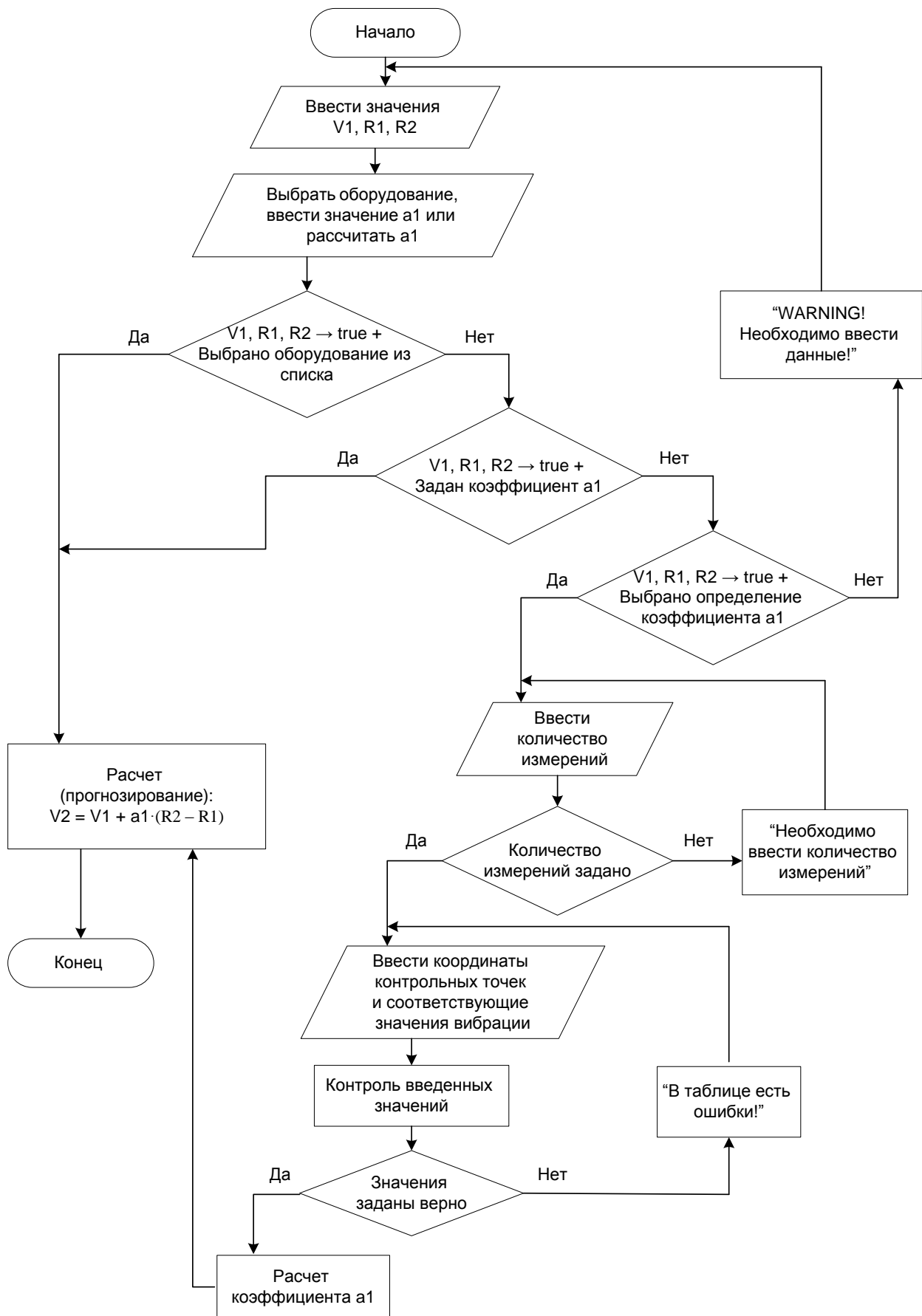


Рисунок 2 – Алгоритм программы для прогнозирования уровня вибрации

На рисунке 3 показано окно разработанной программы для прогнозирования уровня вибрации.

Прогнозирование уровня вибрации

Для прогнозирования уровня вибрации на расстоянии R2 введите значения V1 (дБ), R1 и R2 (м)

V1 =

R1 =

R2 =

Оборудование:

Или значение коэффициента a1:

a1 =

Прогноз: V2 = 75.168 дБ

Рисунок 3 – Окно программы для прогнозирования уровня вибрации

Для прогнозирования уровня вибрации по программе нужно запустить приложение, для фиксированной точки ввести значение измеренного уровня вибрации  $V1$ , координату точки  $R1$ , в которой было получено это значение, расстояние  $R2$ , на котором необходимо спрогнозировать уровень вибрации. Затем выбрать из списка оборудование или ввести значение коэффициента  $a_1$ . Если значение  $a_1$  неизвестно, его можно определить, используя данные эксперимента.

В четвертой главе “Исследование возможности применения Microsoft Visio для визуализации распространения вибрации” показана возможность реализации программного продукта в среде MS Visio для прогнозирования и визуализации уровней вибраций на плоскости, проведена адаптация MS Visio для прогнозирования распространения вибраций, представлен алгоритм прогнозирования.

Прогнозирование вибрации на плоскости имеет большое значение с точки зрения оценки эффективности опор технологического оборудования и с точки зрения оценки фундаментов. В работе показана целесообразность применения для этих целей программного продукта MS Visio, который обеспечивает возможность создания специальных приложений с использованием VBA (Visual Basic for Applications), а также высокую степень интеграции с другими продуктами Microsoft.

Для построения графической модели распространения вибрации, была использована программа для прогнозирования уровня шума, которая состоит из графической части, программной и форм пользовательского диалога.

Был предложен следующий алгоритм прогнозирования распространения вибраций (при прогнозировании распространения по восьми осям):

$$\left\{ \begin{array}{l} P.2.1 = I.2.1, \\ P.2.2 = I.1.2 \cdot P.2.1 / I.1.1, \\ P.2.3 = I.1.3 \cdot P.2.2 / I.1.2, \\ P.2.4 = I.1.4 \cdot P.2.3 / I.1.3, \\ P.2.5 = I.1.5 \cdot P.2.4 / I.1.4, \\ P.2.6 = I.1.6 \cdot P.2.5 / I.1.5, \\ P.2.7 = I.1.7 \cdot P.2.6 / I.1.6, \\ P.2.8 = I.1.8 \cdot P.2.7 / I.1.7, \end{array} \right. \quad (1)$$

где индекс  $I$  – измеренное прибором значение уровня вибрации;

$P$  – значение, рассчитанное по программе;

первая цифра индекса – радиус (расстояние) от источника, 1 – для  $R1$ , 2 – для  $R2$ ;

вторая цифра индекса – номер оси.

$I.1.1, I.1.2, I.1.3, I.1.4, I.1.5, I.1.6, I.1.7, I.1.8$  – измеренные значения уровня вибраций на первом радиусе от источника на каждой оси соответственно;

$P.2.1, P.2.2, P.2.3, P.2.4, P.2.5, P.2.6, P.2.7, P.2.8$  – значения, рассчитанные по программе для второго радиуса на каждой оси;

$I.2.1$  – значение, измеренное на втором радиусе на первой оси.

Таким образом, при реализации алгоритма (1) необходимо произвести измерения на первом выбранном расстоянии по всем осям и одно измерение на втором выбранном расстоянии по одной из осей. Этот алгоритм позволяет определить значения вибраций по всем осям с учетом неравномерности их распространения.

Реализация предложенной методики прогнозирования и визуализации распространения вибрации показана на примере, который проиллюстрирован на рисунке 4, на котором показаны величины вибраций в точках установки опор и оси прогнозирования. Распространение вибраций исследовалось при реализации технологического процесса точения на токарно-винторезном станке.

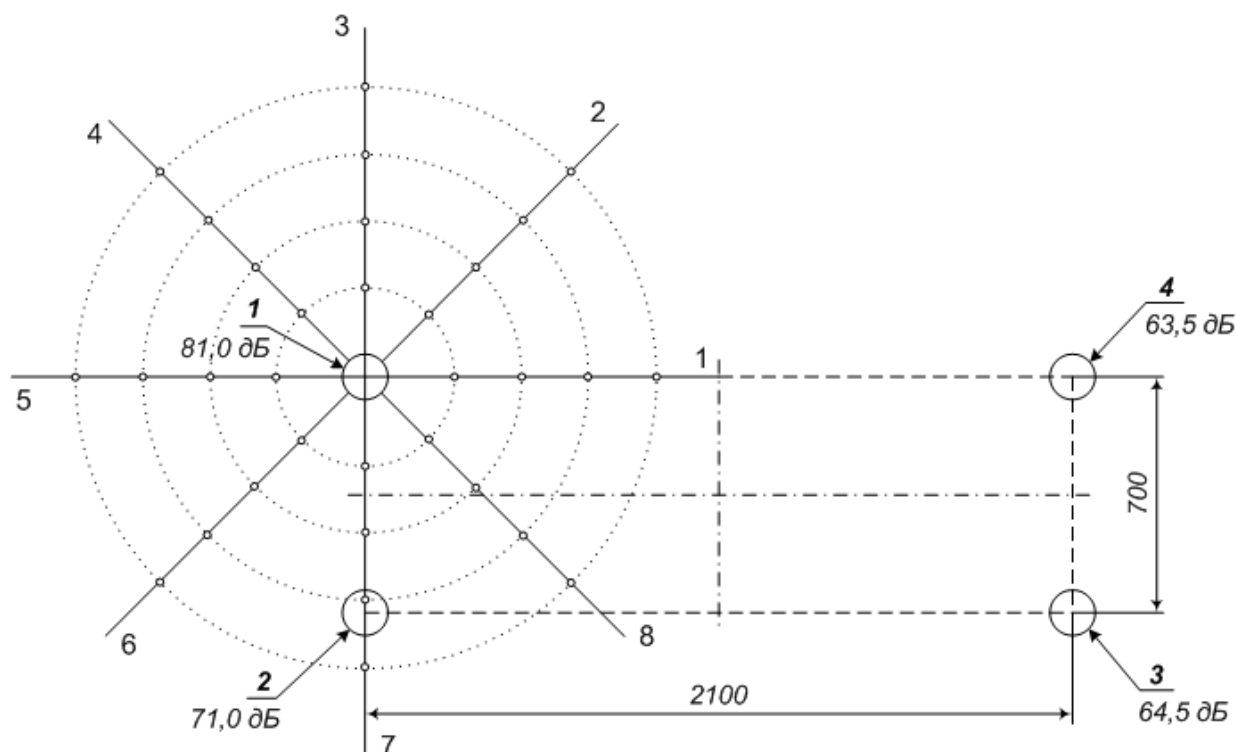


Рисунок 4 – Расположение опор токарно-винторезного станка, контрольных точек на осях и величина виброскорости у каждой опоры

Для анализа достоверности, значения уровней виброскорости, определенные по программе, в контрольных точках были сопоставлены с реальными значениями в этих точках.

Результаты сопоставления прогнозируемых и реальных значений на расстоянии 0,6 м от опоры представлены на рисунке 5.

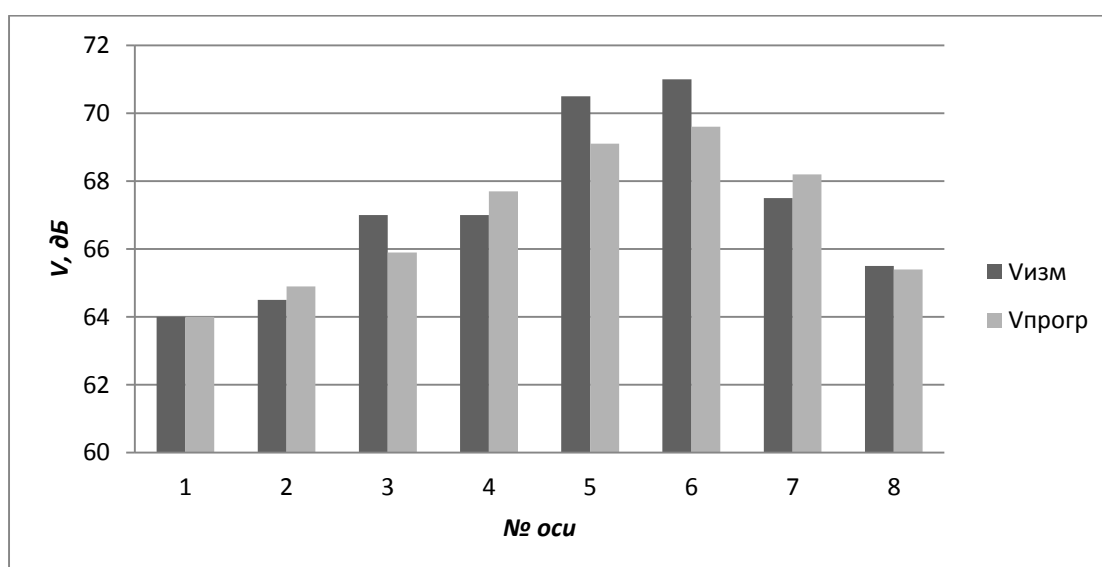


Рисунок 5 – Прогнозируемый и действительный уровень виброскорости в контрольных точках

Анализ результатов исследований, представленных на рисунке 5, показал, что характер изменений прогнозируемых уровней вибраций полностью совпадает с их реальными значениями по всем осям (расхождение составляет не более 1,5 дБ, т.е. не более 3,2 %).

Результаты прогнозирования и визуализации распространения вибраций по 8 осям, полученные с применением программы, разработанной в среде MS Visio, представлены на рисунках 6 и 7.

Результаты экспериментов

Количество замеров     Установить    Эн. эксп. 1    Эн. эксп. 2    Эн. эксп. 3    Эн. эксп. 4

	A	B	C	D	E	F	G
1	№	Знач	Delta	Нов. зн.	Delta	Знач. 2	Delta 2
2	1	68,5	-3,1	64	-2,9	64	-3,1
3	2	69,5	-2,1	64,9	-2	64,5	-2,6
4	3	70,5	-1,1	65,9	-1	67	-0,1
5	4	72,5	0,9	67,7	0,8	67	-0,1
6	5	74	2,4	69,1	2,2	70,5	3,4
7	6	74,5	2,9	69,6	2,7	71	3,9
8	7	73	1,4	68,2	1,3	67,5	0,4
9	8	70	-1,6	65,4	-1,5	65,5	-1,6

Эн. эксп. 5  
Эн. эксп. 6

R1=   
R2=   
при условии, что значение для первого измерения (с новым R) получилось равным

Рассчитать    Нарисовать

Рисунок 6 – Результаты прогнозирования:

- “А” (№) – номер оси на координатной плоскости;
- “В” (“Знач”) – измеренные значения уровня виброскорости на первом радиусе  $R1$  от источника;
- “С” (“Delta”) – отклонения от среднего значения в каждой точке ( $R1$  от источника);
- “D” (“Нов.зн.”) – значения, рассчитанные по программе для второго радиуса  $R2$ , т.е. предполагаемый уровень виброскорости на расстоянии  $R2$  от источника;
- “E” (“Delta”) – отклонения значений, рассчитанных по программе, от среднего значения в каждой точке;
- “F” (“Знач.2”) – измеренные значения уровня виброскорости на втором радиусе  $R2$  от источника;
- “G” (“Delta2”) – отклонения от среднего значения в каждой точке ( $R2$  от источника).

Для формирования пользовательского диалога необходимо ввести следующие данные: количество замеров, при этом появляется таблица на заданное количество осей; расстояния  $R1$  и  $R2$  для формирования визуального отображения результатов прогнозирования; значение вибрации в одной точке на расстоянии  $R2$ .

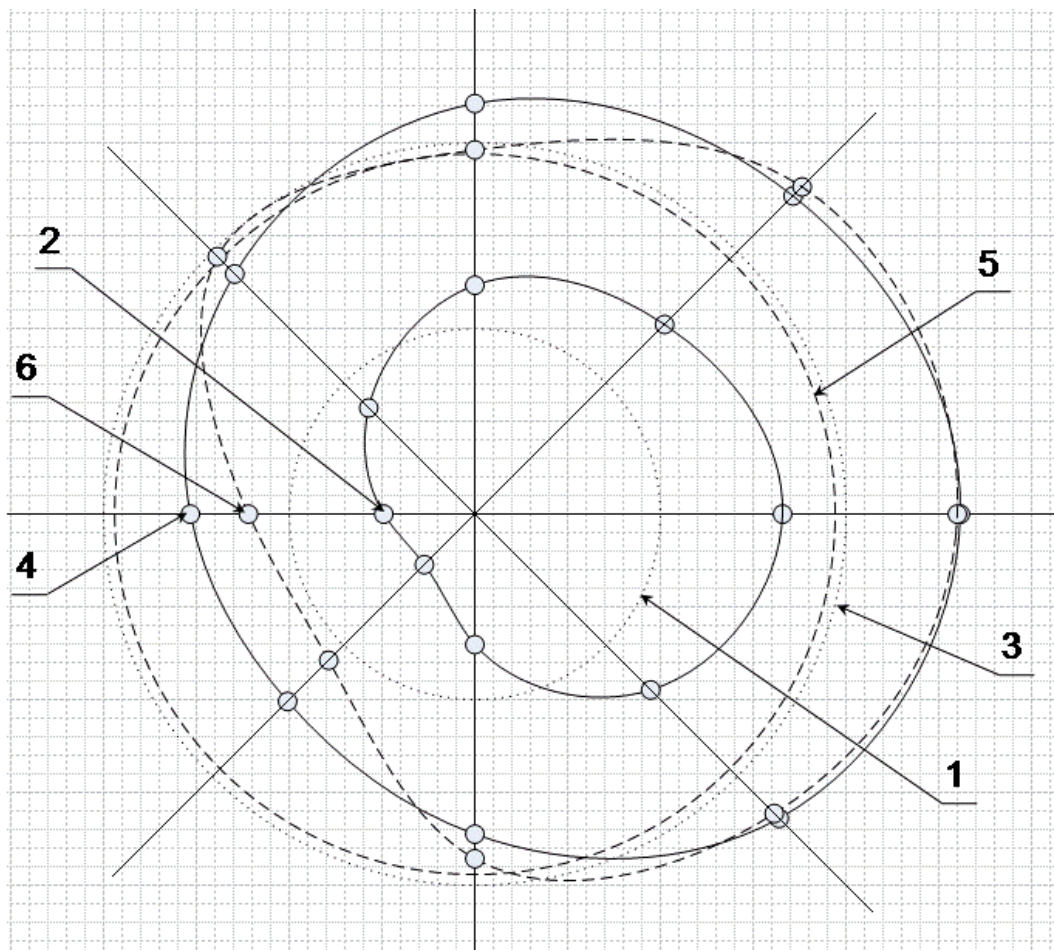


Рисунок 7 – Визуализация распространения вибраций:

1 – среднее значение уровня виброскорости по измеренным значениям на радиусе  $R1$  от источника;

2 – измеренные (действительные) значения уровня виброскорости на первом радиусе  $R1$  от источника;

3 – среднее значение уровня виброскорости, полученное по значениям, рассчитанным по программе для радиуса  $R2$ ;

4 – значения, рассчитанные по программе для второго радиуса  $R2$ , т.е. предполагаемый уровень виброскорости на расстоянии  $R2$  от источника;

5 – среднее значение уровня виброскорости, полученное по измеренным значениям на радиусе  $R2$  от источника;

6 – измеренные (действительные) значения уровня виброскорости на втором радиусе  $R2$  от источника.



Программа формирует визуальные значения виброскорости на разных расстояниях: среднее и действительное значения уровней виброскорости на первом назначенном радиусе  $R1$  от источника, рассчитывает прогнозируемые уровни виброскорости для второго расстояния  $R2$  и определяет среднее значение уровней виброскорости на этом расстоянии.

Таким образом, проведенные исследования экспериментально подтвердили достоверность прогнозирования распространения вибраций на опорных плоскостях и целесообразность их визуализации в среде MS Visio.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Экспериментально установлены взаимосвязи между параметрами, характеризующими вибрацию, и изменением их значений при распространении в среде, отличительной особенностью которых является возможность оценить величины вибраций при реализации технологических процессов по результатам единичных измерений.

2. На основе имеющихся взаимосвязей предложены линейные математические модели, позволяющие обеспечить прогнозирование распространения вибраций в элементах технологического оборудования и на опорных плоскостях по результатам единичных измерений.

3. Предложенные алгоритмы позволили автоматизировать процесс прогнозирования вибраций в технологической среде. Проведенные экспериментальные исследования их реализации обеспечили отклонения значений вибраций от реальных значений не более 2,5 %.

4. Разработанные программы реализации алгоритмов позволили спрогнозировать распространение вибраций в технологической среде по результатам единичных измерений.

5. Проведенные исследования показали целесообразность использования для визуализации распространения вибраций программного продукта MS Visio и возможность адаптации для этого программы, применяемой для прогнозирования и визуализации шума, при этом погрешность отклонений не превысила 3,2 %.

6. Результаты работы рекомендуются к использованию на машиностроительных предприятиях различных отраслей промышленности и в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 220700 “Автоматизация технологических процессов и производств”, 280700 “Техносферная безопасность”.

## СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Шварцбург, Л.Э. Визуализация в среде MS Visio распространения шума и вибраций в рабочей зоне / Л.Э. Шварцбург, Н.В. Дроздова, Е.В. Бутримова // Вестник МГТУ “Станкин”. Научный рецензируемый журнал. – 2011. – №1 (13). – С. 110 – 112 (лично автором – 35 %).
2. Шварцбург, Л.Э. Возможности и адаптация программного продукта MS Visio для визуализации экологической информации / Л.Э. Шварцбург, Н.В. Дроздова, Е.В. Бутримова // Научно-практический и научно-методический журнал “Безопасность жизнедеятельности”. – 2011. – № 10 (130). – С. 35 – 37 (лично автором – 40 %).
3. Шварцбург, Л.Э. Экспериментальное исследование распространения виброакустических факторов в среде для прогнозирования их уровней в заданной точке пространства / Л.Э. Шварцбург, Е.В. Бутримова, Н.В. Дроздова // Научно-практический и научно-методический журнал “Безопасность жизнедеятельности”. – 2012. – № 2 (134). – С. 27 – 30 (лично автором – 60 %).

### Публикации в других изданиях:

4. Бутримова, Е.В. Характеристика методов снижения вибрации технологического оборудования / Е.В. Бутримова // Производство. Технология. Экология – ПРОТЭК-2006: сборник научных трудов № 9 в 3 т. Т.2: Москва / Под ред. член-корр. РАН Ю.М. Соломенцева и проф. Л.Э. Шварцбурга. – 2006. – С. 321 – 325 (лично автором – 100 %).
5. Бутримова, Е.В. Моделирование и визуализация экологической информации / Е.В. Бутримова // Экологическая безопасность как ключевой фактор устойчивого развития: сб. докладов в 2 т. Т.2 / Одиннадцатая международная экологическая конференция студентов и молодых ученых. Москва, МГГУ. – 2007. – С. 64 – 65 (лично автором – 100 %).
6. Бутримова, Е.В. Средства компьютерного моделирования и визуализации / Е.В. Бутримова // Производство. Технология. Экология – ПРОТЭК-2007: сборник научных трудов № 10 в 3 т. Т.2: Москва / Под ред. член-корр. РАН Ю.М. Соломенцева и проф. Л.Э. Шварцбурга. – 2007. – С. 312 – 315 (лично автором – 100 %).
7. Бутримова, Е.В. Возможности и применение концепции CALS-технологий в решении задач мониторинга шума и вибрации / Е.В. Бутримова, Н.В. Дроздова // Производство. Технология. Экология: научные труды. Сборник монографий № 11 в 2 т. Т.1: Москва / Под ред. член-корр. РАН Ю.М. Соломенцева и проф. Л.Э. Шварцбурга. – 2008. – С. 36 – 38 (лично автором – 50 %).
8. Бутримова, Е.В. CALS-технологии в решении задач мониторинга энергетических загрязнений / Е.В. Бутримова, Н.В. Дроздова // Вестник

- МГТУ “Станкин”. Научный рецензируемый журнал. – 2008. – № 3 (3). – С. 43 – 45 (лично автором – 50 %).
9. Бутримова, Е.В. Графическое моделирование экологической информации в Microsoft Visio / Е.В. Бутримова, Н.В. Дроздова // Техносферная безопасность, надежность, качество, энергосбережение: Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XII. – 2010. – 503 с. (лично автором – 50 %).
  10. Бутримова, Е.В. Моделирование и визуализация распространения шума и вибрации в рабочей зоне / Е.В. Бутримова, Н.В. Дроздова // XXII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2010 “Будущее машиностроения России”: сборник материалов конференции с элементами научной школы для молодежи. – 2010. – С. 10 (лично автором – 50 %).
  11. Бутримова, Е.В. Визуализация распространения энергетических загрязнений в пространстве / Е.В. Бутримова, Н.В. Дроздова // Машиностроение – традиции и инновации МТИ-2010. Материалы III научно-образовательной конференции: сборник докладов. – 2010. – С. 12 – 17 (лично автором – 50 %).
  12. Бутримова, Е.В. Исследование колебательных процессов в технологической среде пространстве / Е.В. Бутримова, Н.В. Дроздова // Производство. Технология. Экология: Монография, выпуск № 14. – 2011. – С. 13 – 16 (лично автором – 70 %).
  13. Бутримова, Е.В. Применение линейного моделирования для анализа распространения вибрации в технологическом оборудовании / Е.В. Бутримова // Автоматизация и информационные технологии – АИТ-2012. Материалы всероссийской молодежной конференции: Сборник докладов, Т.1. – 2012. – С. 59 – 62 (лично автором – 100 %).
  14. Бутримова, Е.В. Исследование возможности применения линейного моделирования при прогнозировании распространения вибрации в технологическом оборудовании / Е.В. Бутримова // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте. Материалы XIV Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов. Сборник докладов. – 2013 (лично автором – 100 %).
  15. Бутримова, Е.В. Автоматизированное прогнозирование уровней вибрации в технологическом оборудовании / Е.В. Бутримова // Bezpieczeństwo procesu technologicznego. Monografia. – IBEN Gorzów Wlkp. – Poznań. – 2013. pp. 109 – 113 (лично автором – 100 %).

Подписано в печать 27.09.2013  
Формат А5  
Бумага 80 г/м<sup>2</sup>  
Тираж 100 экз.  
Отпечатано ООО «РВК.ру»  
г. Москва, ул. Бутырский вал, 48