

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

О.В. Дмитриева, А.Б. Переладов, Е.М. Кузнецова, И.П. Камкин

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНСТРУМЕНТА
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Курган 2017

УДК 621.9.04.
ББК 34.5
К63

Рецензенты

кафедра «Технология и оборудование машиностроительного производства»
автомеханического факультета Волжского политехнического института (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения выс-
шего образования «Волгоградский государственный технический университет»,
зав. кафедрой, д-р. техн. наук, профессор **В.А. Носенко**;
главный технолог АО «СКТБ «Курганприбор», канд. техн. наук
В.М. Коротенко.

*Печатается по решению методического совета Курганского государ-
ственного университета.*

Компьютерное проектирование и моделирование технологий и инстру-
мента в машиностроении : учебное пособие / О. В. Дмитриева, А. Б. Переладов,
Е. М. Кузнецова, И. П. Камкин. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2017. –
70 с.

Содержание учебного пособия отражает результаты научных исследований
и моделирования взаимодействия шлифовального инструмента с обрабатываемой
поверхностью, моделирование и исследование условий устойчивости процесса ре-
зания при обработке деталей машиностроения, проведенных авторами. Кроме то-
го, отдельные разделы посвящены описаниям специализированных САПР для
проектирования технологического оснащения шлифования «ШЛИФДИЗАЙН» и
САПР на основе нейросетевого программирования, приведены рекомендации по
использованию. Для расчетов и моделирования использованы программные про-
дукты Mahtcad, MATLAB, T-Flex и элементы нейросетевого программирования.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по направлениям
укрупненной группы специальностей 15.03.00 «Машиностроение», магистрантов,
аспирантов и других направлений инженерного образования.

Рис. – 40, табл. – 6, библиограф. – 35 назв.

УДК 621.9.04.
ББК 34.5

ISBN 978-5-4217-0430-0

© Курганский государственный
университет, 2017
© Дмитриева О.В., Переладов А.Б.,
Кузнецова Е.М., Камкин И.П., 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	5
1.1 Моделирование структуры абразивного инструмента.....	5
1.2 Моделирование процесса шлифования с использованием САПР T-Flex	10
1.3 Разработка вероятностных моделей взаимодействия шлифовального круга с поверхностью заготовки в процессе шлифования на основе результатов экспериментальных исследований	18
1.4 Проектирование режимно-инструментального оснащения операций шлифования с использованием специализированной САПР «ШЛИФДИЗАЙН»	24
1.4.1 Информационный раздел	26
1.4.2 Раздел проектирования операций.....	29
1.4.3 Раздел подготовки производства.....	32
1.4.4 Рекомендации по применению САПР «ШЛИФДИЗАЙН» на машиностроительном предприятии	33
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATLAB.....	36
2.1 Применение модели Лоренца для исследования устойчивости процессов	36
2.2 Создание математических моделей в программном пакете MATLAB	41
2.3 Исследование устойчивости процесса резания металлов с применением MATLAB	48
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ.....	54
3.1 Создание модели на основе искусственной нейронной сети	54
3.2 Применение нейросетевых моделей для разработки технологических операций.....	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности производства, обеспечение качества и надежности деталей машин и оборудования во всех отраслях промышленности определяется совершенствованием операций обработки, в том числе лезвийной и финишной обработки стальных деталей. Применение современных компьютерных технологий проектирования на этапе разработки изделий и технологических процессов позволяет существенно сократить сроки технологической подготовки производства.

Отсутствие универсальных математических моделей, описывающих технологические процессы механической обработки деталей в машиностроении, обуславливает необходимость поиска новых подходов и методов описания и формализации данных процессов. Сложность задачи проектирования и моделирования обусловлена прежде всего многофакторностью протекающих процессов, наличием значительного количества влияющих величин и вероятностным характером протекающих процессов.

Создание математических моделей процесса шлифования, позволяющих определять параметры инструмента и режима обработки, возможно на основе двух подходов:

- 1) на основе физических экспериментов, анализа экспериментальных данных и создания расчетных зависимостей;
- 2) с применением нейро-сетевого программирования.

В пособии рассматриваются примеры создания специализированных систем автоматизированного проектирования инструмента и технологии шлифования различных материалов с использованием каждого из предложенных подходов.

Динамические процессы в технологических системах существенно влияют на устойчивость процесса резания, качество и точность обработки. В процессе резания устойчивое движение упругой системы станка нарушается биениями, периодическим изменением амплитуды автоколебаний и переходом к хаотическому движению. Устойчивое функционирование технологической системы достигается при самоорганизации системы резания. Определение параметров технологической системы, обеспечивающих устойчивые режимы работы, возможно методами математического моделирования с использованием современных программных средств моделирования. В пособии рассмотрены теоретические основы разработки математической модели процесса резания и приведен пример определения границ устойчивости процесса при различных значениях параметров процесса.

1 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1 Моделирование структуры абразивного инструмента

Производительность и качество операций абразивной обработки определяется характеристиками абразивного инструмента, которые формируются при его проектировании и изготовлении. Современный абразивный инструмент (АИ) имеет сложный зерновой состав и изготавливается с использованием различных структурных и технологических наполнителей, что требует определения оптимальных размеров частиц и объемных соотношения компонентов [1]. При проектировании и изготовлении рассчитываются двух - или трехкомпонентные дисперсные системы (ДС), состоящие из абразивных зерен (АЗ), дисперсных структурных наполнителей, не разрушающихся в процессе прессования и обжига и обеспечивающих формирование устойчивого каркаса структуры АИ. Показатели строения структуры инструмента во многом определяют технологичность его изготовления на стадиях прессования и спекания сформованной заготовки инструмента [1; 2].

Проектирование структуры абразивного инструмента направлено на достижение требуемой (или максимальной возможной) плотности укладки АЗ и структурных наполнителей, образующих каркас АИ. Критериями оптимизации служат показатели структуры АИ: коэффициент заполнения объема инструмента материалом АЗ и структурных наполнителей ($K_{см}$), плотность смеси, объем пор и другие.

В результате исследований, проведенных на кафедре автоматизации производственных процессов Курганского госуниверситета с использованием опыта и результатов известных исследований, методов расчета и управления параметрами ДС были получены математические зависимости для расчета и моделирования АИ. При выборе метода и средств исследования, учитывалось, что подобные системы имеют микронеоднородную организацию, обусловленную случайным распределением показателей дисперсных частиц (форма, размеры, рассев, зерновой состав, другие показатели) и их положением в пространстве [1; 2; 3]. Стохастическая природа, характер структуры абразивного инструмента и большое число составляющих ее частиц, представляющих собой дисперсные элементы в

виде абразивных зерен, обусловили организацию исследования на основе использования закона больших чисел с применением специально разработанных программных средств компьютерного моделирования дисперсных структур.

Моделирование осуществлялось с использованием написанной на языке С++ компьютерной программы, позволяющей создавать 3-мерные вероятностные модели дисперсных систем, имеющих непрерывный и разорванный зерновые составы смеси из частиц условно неупругого материала (далее зерна) с абсолютно гладкой поверхностью, имеющих сферическую и/или эллипсоидную формы [4]. В качестве дополнительного элемента в модели дисперсной системы учитывалась связка, которая равномерно покрывая зерна (рисунок 1.1 а) в инструменте при смешивании, в процессе термообработки, размягчается и стягивается в места контакта зерен, формируя мостики связки (рисунок 1.1 б).



*а – до расплавления связки; б – после спекания инструмента
с образованными мостиками связки*

Рисунок 1.1 – Контакт между зернами

Моделирующая программа позволяет рассчитать наполнение заданного виртуального объема путем последовательного размещения в нем зерен, составляющих ДС моделируемого инструмента. Принадлежность очередного зерна к совокупности зерен той или иной зернистости (в случае моделирования систем, состоящих из нескольких зернистостей), его диаметр, показатель изометричности зерна определялись с использованием генератора случайных чисел и с учетом нормального закона распределения зерен.

Равномерное наполнение объема и максимальная плотность упаковки обеспечивались пространственным расположением с 3-мя начальными точками контакта (начальное координационное число N_n) с другими зернами и границами объема и минимальной координатой по высоте объема. Цикл генерации параметров и размещения очередной модели зерна в объеме повторялся до полного его заполнения заданным числом зерен.

На рисунке 1.2 изображен пример объемной укладки полизерновой ДС, состоящей из 3-х зернистостей, в ограниченном пространстве, которое образовано условными плоскостями дна и стенок объема [4]. Общее число зерен в модели - 9000, число зернистостей – 3, соотношение диаметров зерен – 6 / 16 / 40 и соответствующее объемное соотношение зернистостей – 20 / 60 / 20; объем ДС занятый сферами ($K_{см}$) – 77%, объем ДС занятых порами ($K_{пор}$) – 23%.

Результатом работы программы являлась построенная трехмерная модель упаковки зерен ДС и рассчитанные параметры ее структуры. На рисунке 1.2 содержатся графики изменения плотности ДС по высоте (вертикальный график слева) и по ширине (горизонтальный график снизу) смеси. Неоднородность ДС хорошо видна по краям кривых графиков.

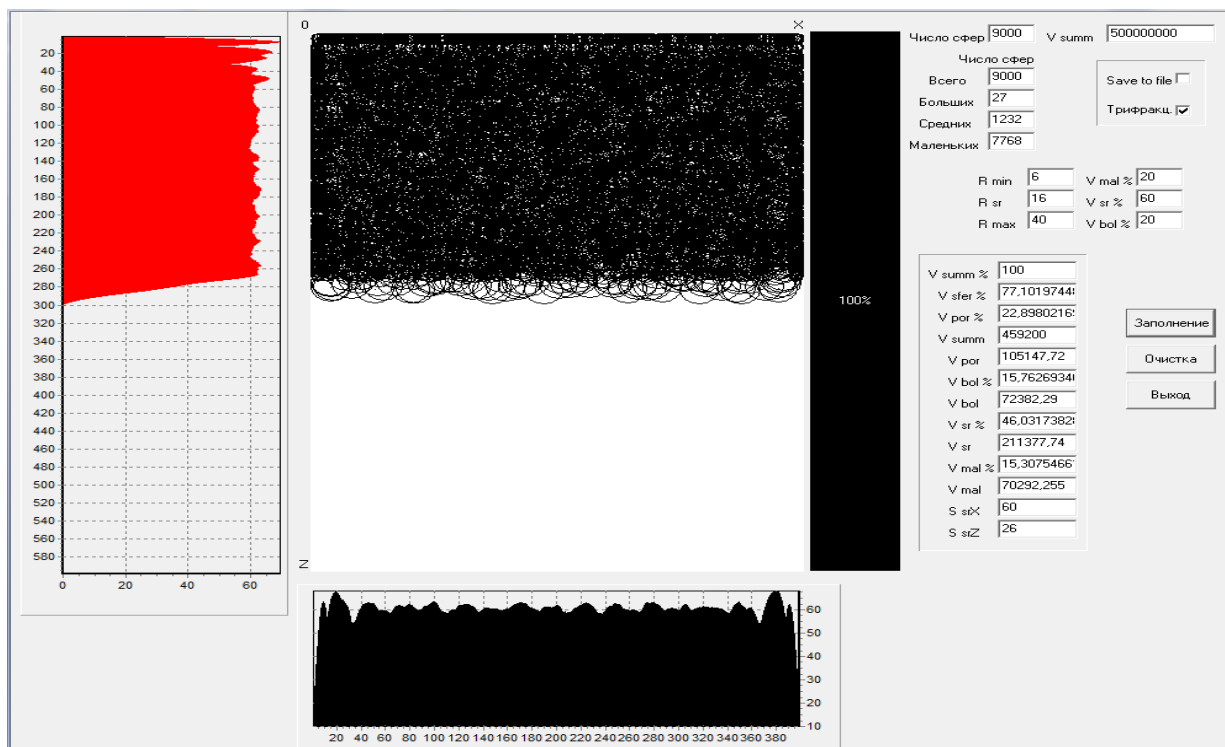


Рисунок 1.2 – Интерфейс программы для моделирования ДС с исходными данными и результатами моделирования

Результаты компьютерного моделирования структуры абразивного инструмента, состоящей из зерен одной зернистости с содержанием связки 12,5% от объема смеси ($K_{см} = 0,48$); зерна – неплоский эллипсоид с соотношением полуосей 1,1; число зерен ДС $Z = 193$ шт; позволяют получить значения координационного числа (K_v) – числа контактов каждого зерна с соседними (рисунок 1.3).

Представленная программа позволяет создавать модели высоких структур абразивного инструмента (например, арочные), с объемным содержанием материала абразивного зерна менее 50%, путем использования различных начальных значений N_n ($N_n = 1, 2, 3$) с определенным соотношением вероятности их реализации в модели. Компьютерная модель позволяет определять число, объемы и площади сечений мостиков связки, скрепляющих абразивные зерна, что делает возможным проектирование абразивного инструмента с требуемыми показателями структуры и твердости [4].

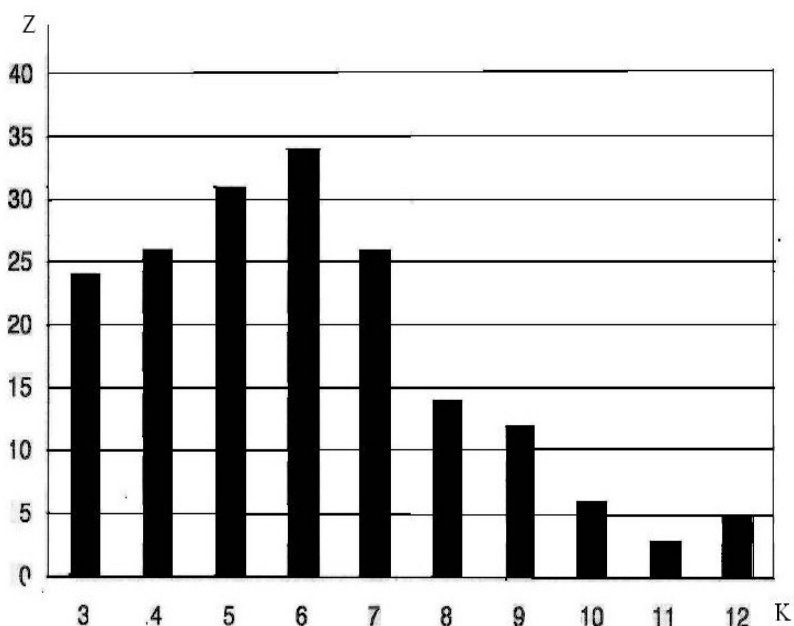


Рисунок 1.3 – Гистограмма частоты (Z_k) определенных значений K_v для ДС

Разработанная программа позволяет моделировать структуры ДС, имеющие вероятностную природу строения и определять оптимальный зерновой состав абразивных масс для изготовления абразивного инструмента с заданным объемным содержанием материала абразивных зерен и структурных наполнителей. Спроектированная структура абразивного инструмента устойчива и не подвержена усадке при термообработке, и поз-

воляет не допускать избыточного прессования заготовки инструмента, приводящего к разрушению его структурных элементов.

Результаты компьютерного моделирования проверялись с использованием физической модели дисперсной системы. В качестве моделей зерен использовались гранулы не вспененного полистирола (плотность $1,005 \text{ г/см}^3$, коэффициент изометричности 1,05) 3-х зернистостей (средние размеры зерен зернистостей составили 0,30 мм, 0,815 мм и 2,05 мм) с различными их объемными соотношениями. В ходе эксперимента определялся параметр $K_{см}$.

На основе экспериментальных данных было получено полиномиальное регрессионное уравнение. Полученное полиномиальное уравнение позволило построить линии равных значений на симплекс плане эксперимента. Разница полученных значений K_q у компьютерной и физических моделей не превышала 3% [5].

На основе результатов моделирования координационного числа и рассчитанных диаметров мостиков связки были определены вероятностное распределение прочности удержания зерен на рабочей поверхности инструмента и формула для расчета средних допустимых значений $P_{уд}$ с определенными характеристиками.

Использование результатов моделирования применялось при проектировании шлифовальных кругов из электрокорунда белого на керамической связке с закрытыми структурами (суммарное объемное содержание шлифматериала различных зернистостей составляло 52-58%), имеющими оптимальный полизерновой состав.

Рассчитанные показатели средних допустимых значений сил резания $P_{уд}$ для инструмента из электрокорунда белого на керамической связке приведены в таблице 1.1.

Расчеты позволили обеспечить минимальное усилие прессования заготовки круга с обеспечением устойчивой структуры. Методика применялась при расчете формовочных смесей для изготовления бифракционного инструмента – шлифовальных кругов 1 900×100×305 с характеристиками 25AF40/F60 F 4 V и 25AF40 F 6 V и их статических характеристик на ОАО «Челябинский абразивный завод».

Таблица 1.1 – Средние значения предельно допустимых сил резания для инструмента на керамической связке из зерна 25А Р_{уд} (Н); $\sigma_{сж} = 490$ МПа, $\sigma_p = 70$ МПа

K_{CB}	$d_3,$ мм	K_3						
		0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50
0,06	0,16	4,12	4,00	3,88	3,78	3,68	3,58	3,50
	0,25	10,06	9,76	9,48	9,22	8,97	8,75	8,54
	0,40	25,76	24,98	24,26	23,59	22,97	22,39	21,85
0,08	0,16	5,04	4,89	4,75	4,62	4,50	4,38	4,27
	0,25	12,31	11,94	11,59	11,27	10,98	10,70	10,44
	0,40	31,51	30,56	29,67	28,86	28,10	27,39	26,73
0,1	0,16	5,89	5,72	5,55	5,40	5,26	5,12	5,00
	0,25	14,39	13,95	13,55	13,18	12,83	12,51	12,21
	0,40	36,84	35,72	34,69	33,74	32,85	32,02	31,25
0,12	0,16	6,70	6,49	6,31	6,13	5,97	5,82	5,68
	0,25	16,35	15,85	15,40	14,97	14,58	14,21	13,87
	0,40	41,85	40,58	39,41	38,33	37,32	36,38	35,50
0,14	0,16	7,46	7,23	7,03	6,83	6,65	6,48	6,33
	0,25	18,21	17,66	17,15	16,68	16,34	15,83	15,45
	0,40	46,62	45,21	43,90	42,70	41,57	40,52	39,54

1.2 Моделирование процесса шлифования с использованием САПР T-Flex

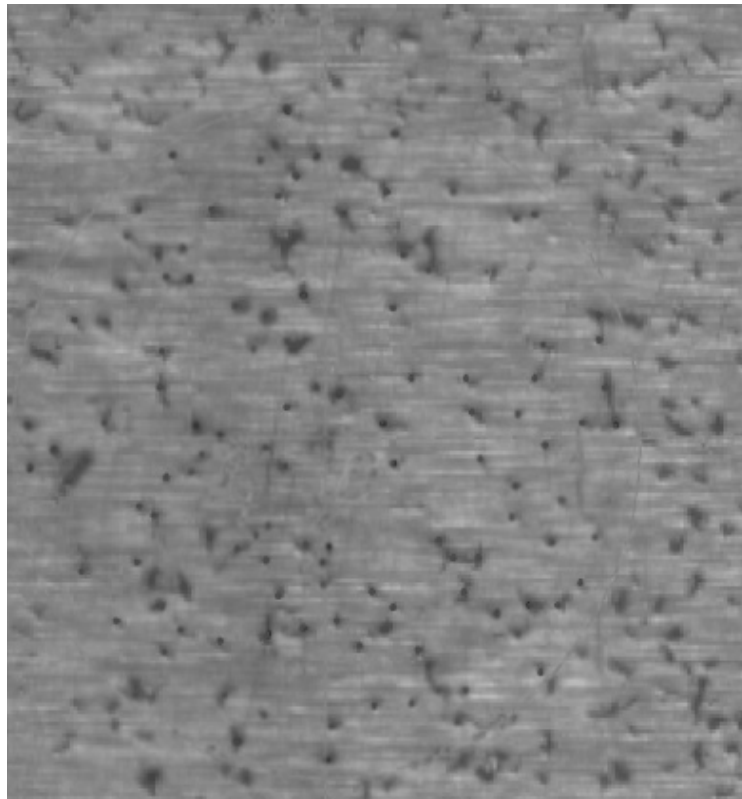
Для прогнозирования силовых параметров резания и создания расчетных моделей процесса шлифования необходимо определение показателей микрорезания зернами материала заготовки, с учетом их перекрытия в процессе работы. Опубликованные результаты проведенных исследований строения РП различных авторов [2; 6] значительно отличаются друг от друга по ряду параметров, что можно объяснить различием применяемых подходов, методик исследований, используемых приборов и оборудования. В настоящее время отсутствует единое мнение о характере распределения вершин абразивных зерен в объеме рабочего слоя на РП инструмента.

Для анализа экспериментальных данных на кафедре АПП были проведены исследования рельефа рабочей поверхности (РП) и определены показатели распределения вершин АЗ по поверхности инструмента в реальных условиях формирования [7].

Объектом исследований являлась РП шлифовального круга (РП ШК) с характеристиками: 1 250x20x76 25А F60 J 8 V. При изготовлении ШК контролировались: рассев шлифзерна, плотность и твердость спеченного инструмента. В процессе проведения эксперимента РП ШК, установленного на шпинделе плоскошлифовального станка модели 3Е711ВФ3, правилась алмазным карандашом (тип 3908–0052, исп. А). Правленным ШК осуществлялась обработка закаленного стального образца (сталь Р6М5, НРС 62) по схеме плоского шлифования с осевой подачей. После приработки ШК его рабочая поверхность прокатывалась по специально подготовленному образцу из алюминиевой ленты толщиной 2 мм (исходная шероховатость поверхности $R_a=0,32$ мкм) с использованием механизма продольной подачи рабочего стола станка. Глубина прокатывания составила 0,02 мм. Фотография участка алюминиевого образца с отпечатками вершин зерен, выполненная цифровой камерой (матрица: кроп-фактор 1,6; 16Мп), представлены на рисунке 1.4 а.

На рисунке 1.4 б показаны изображения вершин АЗ после проведенной компьютерной обработки фотографии ленты с отпечатками. Характер распределения плотности вероятности расстояний между вершинами АЗ определялся с использованием специально разработанного алгоритма программного поиска соседних зерен. Для центра отпечатка каждой вершины АЗ находили расстояния до ближайших центров отпечатков других зерен и определяли их средние значения l . На рисунке 1.5 изображены гистограммы распределения плотности вероятности значений l и распределения площадей отпечатков следов АЗ (S_3).

Полученные экспериментальные статистические данные о РП инструмента были использованы для разработки методики и схемы компьютерного моделирования процесса шлифования. Построенная вероятностная компьютерная модель РП расположения вершин абразивных зерен, использовалась при создании геометрической модели кинематического взаимодействия РП с заготовкой для схемы плоского шлифования периферией ШК прямого профиля (рисунок 1.6).



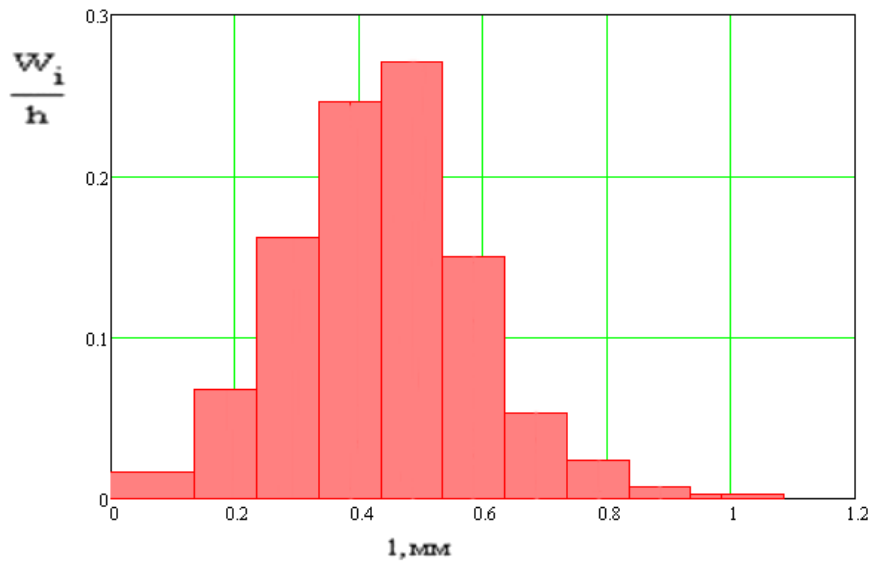
a



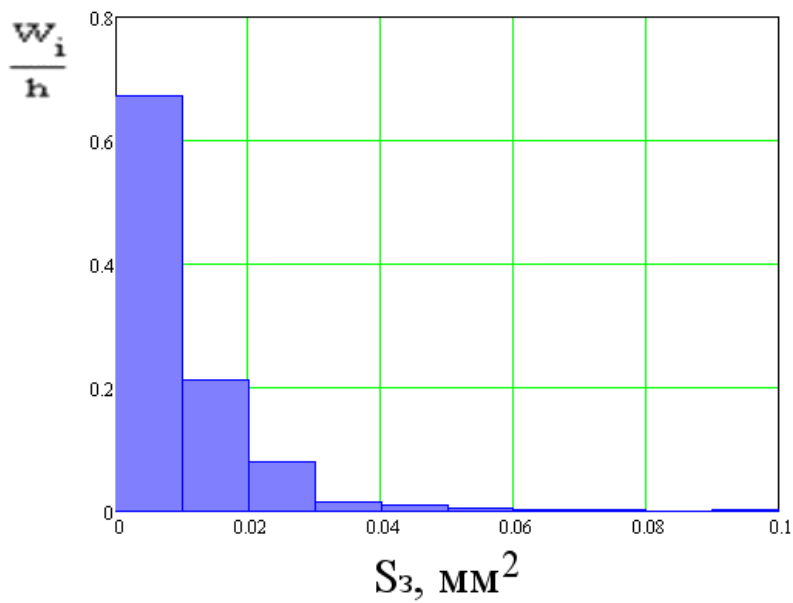
б

*a – фотография; б – обработанное компьютерное изображение
с выделенными отпечатками вершин зерен*

Рисунок 1.4 – Участок поверхности образца с отпечатками вершин зерен



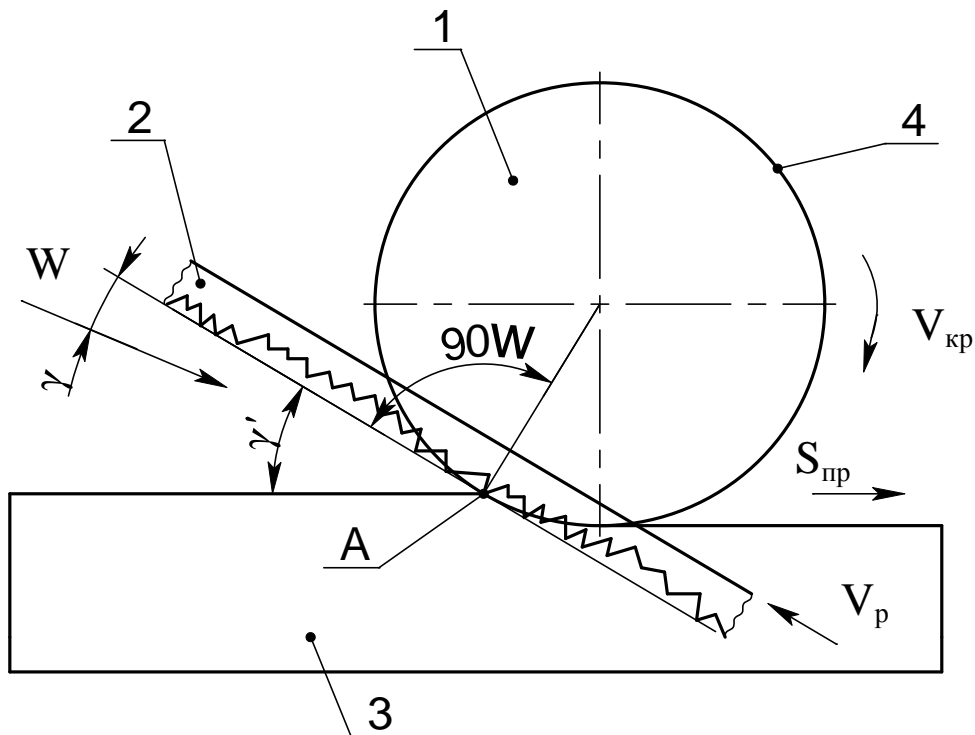
a



б

a – средние значения расстояний до ближайших центров отпечатков других зерен *l*; *б* – площади отпечатков следов S_3

Рисунок 1.5 – Гистограммы распределения плотности вероятности значений параметров



1 – шлифовальный круг; 2 – условное изображение развертки РП ШК; 3 – обрабатываемая заготовка; W – вектор зрения; $V_{кр}$ – скорость периферии ШК, соответствующая скорости движения развертки РП ШК (V_p); $S_{пр}$ – вектор продольной подачи; A – точка пересечения проекций шлифуемой поверхности и РП ШК на плоскость рисунка; γ' – угол между условной плоскостью, ограничивающей РП ШК, и обрабатываемой поверхностью; γ – угол «атаки» РП (определяется режимами шлифования и диаметром ШК)
 Рисунок 1.6 – Схема моделирования взаимодействия ШК с заготовкой

Моделирование осуществлялось в технологической САПР T-Flex CAD 12 (номер лицензионного ключа 1A4FA6A7). Использование данного программного комплекса позволило значительно упростить технологию моделирования и расширить его возможности за счет использования набора базовых функций создания сложных многоэлементных геометрических объектов (сборок) [8].

На первом этапе моделирования была создана вероятностная 3-х мерная компьютерная модель РП ШК в виде плоской развертки, представляющая собой РП с размещенными на ней вершинами зерен, которые имеют форму конуса с углом при вершине 160° [2]. Координаты вершин задавались с помощью генератора псевдослучайных чисел в соответствии

с определенным законом изменения плотности их распределения по поверхности (равномерный) и высоте рабочего слоя (зависимость в степени 2,15 [9]). Плоскость модели РП располагалась параллельно вектору V_p и оси вращения инструмента и проходила через точку выхода (входа) вершины зерна из заготовки (в заготовку) в зависимости от направления вращения ШК.

Параметр γ является комплексным коэффициентом, определяющим степень нагружения РП и, соответственно, режущих зерен в зависимости от значений переменных формулы.

С использованием рассчитанного значения γ , на вертикальную плоскость 3 программой строилась проекция вершин зерен, расположенных на развертке РП (плоскость 2), которая наклонена по отношению к своему первоначальному положению (плоскость 1), соответствующему нулевой производительности процесса, под углом γ (рисунок 1.7).

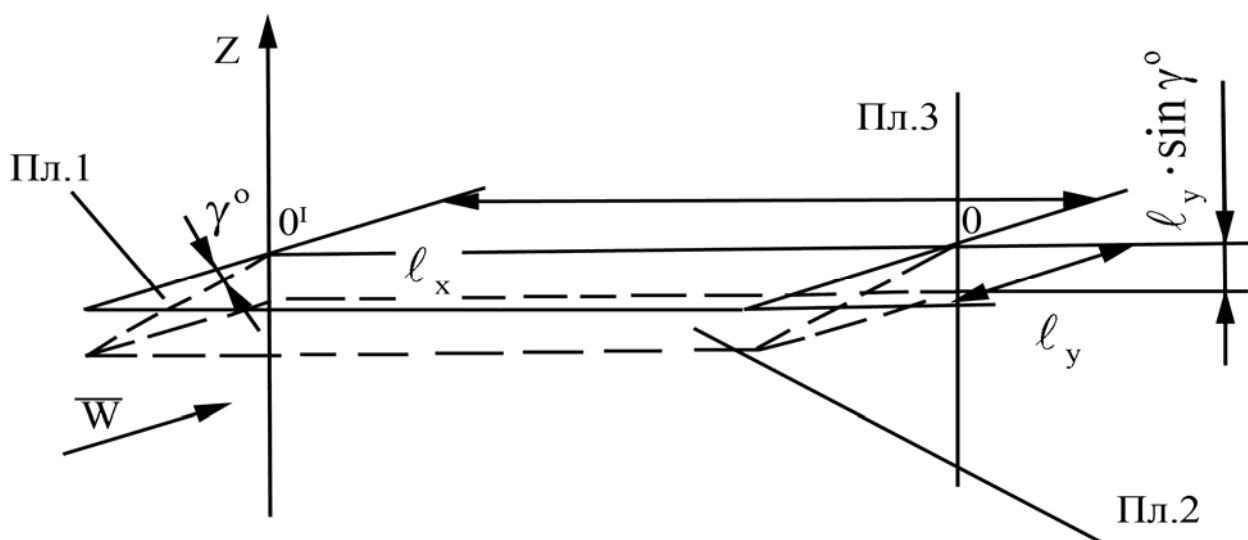


Рисунок 1.7 – Взаимное расположение плоскостей в пространстве

Конечным результатом геометрического моделирования является универсум проекций видимых (активных) вершин АЗ на плоскость 3, с учетом их перекрытия впереди стоящими зернами (рисунок 1.8) в момент их выхода (входа) из обрабатываемой поверхности заготовки (в поверхность заготовки), где площадь сечения срезаемых стружек и, соответственно, силы резания имеют максимальную величину. Увеличение угла γ между вектором W (принадлежит пл. 2; проекция вектора W на пл. 1 перпендикулярна пл. 3), приводит к увеличению площадей вершин и числа видимых зерен и, соответственно, наоборот. Для наглядности и обеспече-

ния достаточного объема статистического материала, соотношение ширины и длины модели РП принималось как 1:100.

Темный фон на рисунке 1.8 составляют зерна, находящиеся в зоне краевого эффекта, которые не учитываются при обработке результатов. Соотношение масштабов увеличения по горизонтальной и вертикальной осям рисунка 1:3

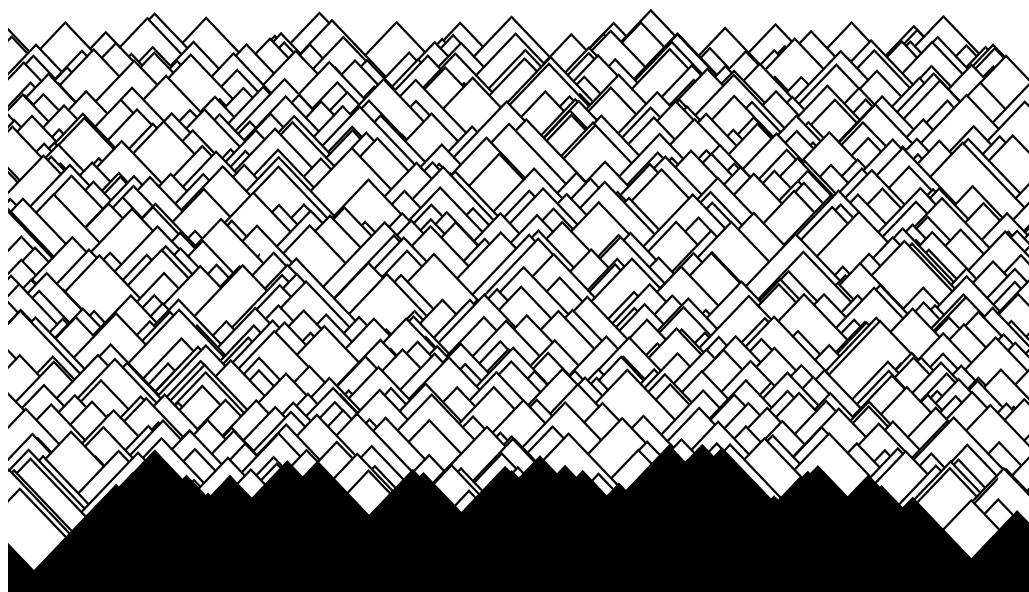


Рисунок 1.8 – Изображения поперечных сечений срезаемых стружек, полученных моделированием процесса микрорезания

Модели вершин АЗ вставлялись как отдельные фрагменты, а сама модель представляет собой файл 3D-сборки. Такой подход позволяет изменять вид и форму модели вершины АЗ с минимальной доработкой. Моделирующая программа (макрос) был написан на языке С#, с использованием встроенного в T-Flex компилятора [10].

Входными параметрами модели являются:

- количество вершин зерен в модели;
- средний диаметр основной фракции зерен;
- доля объемного содержания материала АЗ в единичном объеме круга;
- высота круга;
- высота рабочего слоя;
- пределы изменения высот моделей вершин АЗ;
- процент зерен, исключаемых из анализа, для устранения краевого эффекта (5-10% впереди стоящих зерен от общего их числа).

Угол при вершине конуса (модели зерна) также был принят в качестве параметра модели.

Моделирующая программа определяла координаты вершин АЗ и их распределение в объеме рабочего слоя модели РП ШК. Ширина поверхности круга и глубина рабочего слоя являются входными параметрами, а длина модели РП вычисляется исходя из плотности расположения вершин АЗ по площади РП ШК. Плотность АЗ зависит от глубины рабочего слоя. По известной площади и ширине рабочей поверхности вычислялась длина моделируемой РП. Вершины АЗ располагались в пространстве модели с помощью генератора псевдослучайных чисел из библиотеки Net Framework 3.5. По осям X и Y координаты вершин АЗ имеют равномерное распределение, а по координате h – в соответствии с принятым законом. Каждой вершине АЗ присваивался уникальный цвет и фиксировались ее координаты, что необходимо для дальнейшего анализа полученных моделированием результатов.

Полученная 3D модель развертки РП ШК представляет собой файл сборки T-Flex, в котором расположены модели зерен, сохраняемый в файловой системе компьютера для дальнейшей работы. На рисунке 1.9 представлен участок 3D модели развертки РП ШК.

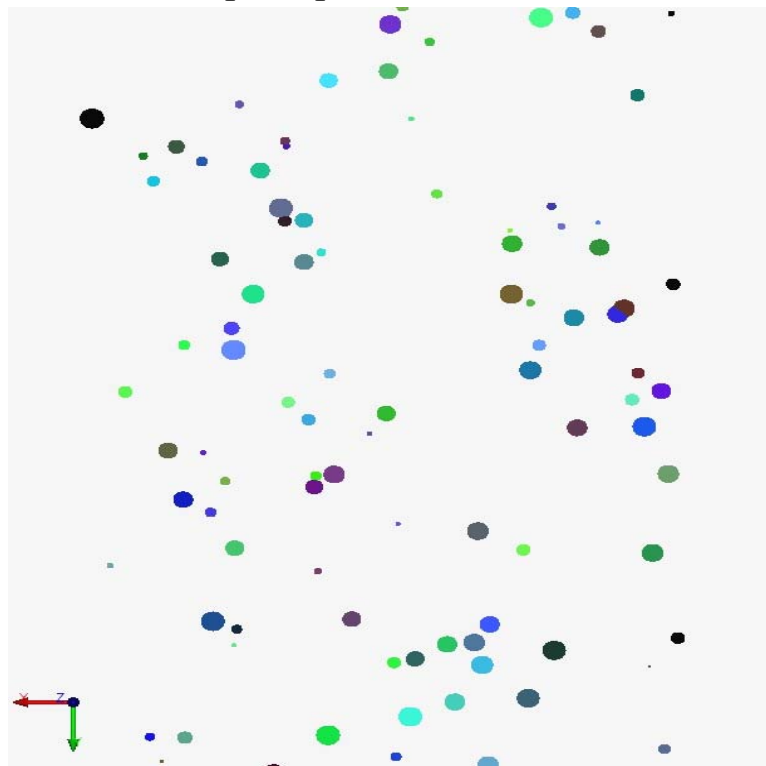


Рисунок 1.9 – Участок модели развертки РП ШК (вид сверху) с распределенными вершинами зерен

Полученная 3D модель РП проецировалась в направлении вектора W на плоскость Z по схеме, изображенной на рисунке 1.7. Полученное изображение проекции экспортировалось в растровый файл, анализ которого позволил получить данные о количестве и площадях видимых вершин A_3 , осуществляющих резание (рисунок 1.10).

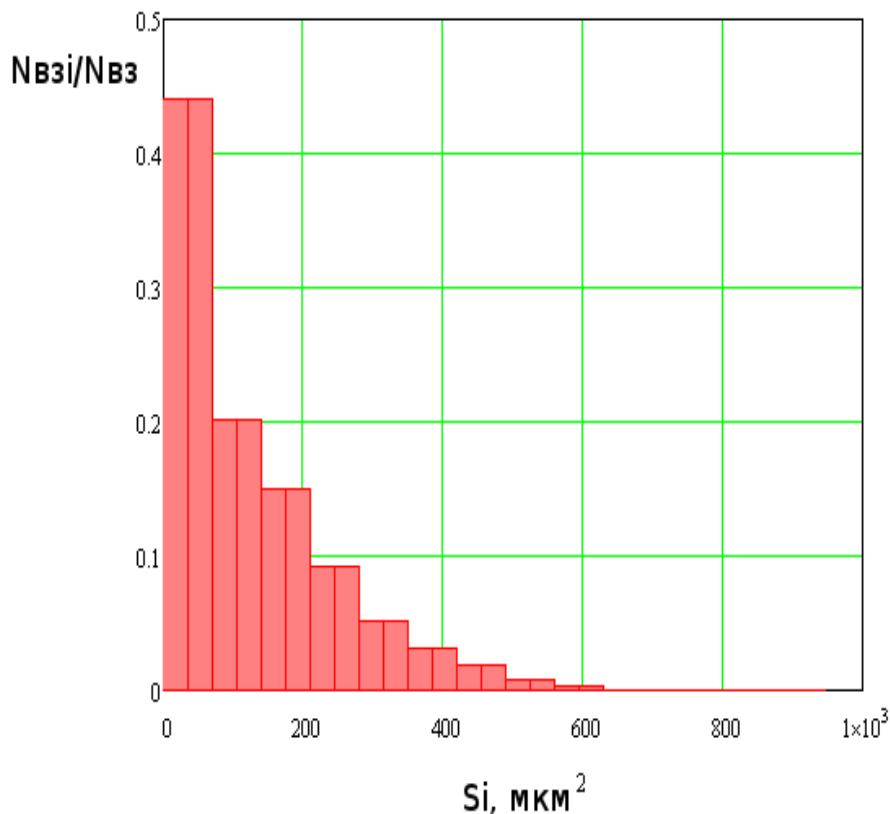


Рисунок 1.10 – Гистограмма распределения активных (видимых) A_3

По результатам моделирования стало возможно определение статистических показателей взаимодействия вершин зерен (формы и размеров сечений срезаемых стружек) с обрабатываемым материалом, сил, действующих на единичные зерна при срезании стружки, силовых характеристик и мощности процесса шлифования.

1.3 Разработка вероятностных моделей взаимодействия шлифовального круга с поверхностью заготовки в процессе шлифования на основе результатов экспериментальных исследований

Сложность исследования и математического описания поверхности контакта (ПК) инструмента с заготовкой связано с многообразием типов и размеров шлифовального инструмента, износом его РП в течение периода

стойкости и различием времени его эксплуатации до полного износа. Например, наружный диаметр ШК прямого профиля может уменьшаться до 2-х и более раз, что оказывает существенное влияние на площадь ПК и характеристики процесса обработки. Изменение условий резания активных режущих зерен и общего их числа в зоне контакта инструмента с заготовкой в результате износа ШК и формы РП из-за образования заборного конуса (например, у кругов прямого профиля) приводит к изменению производных показателей работы инструмента: режима его работы (осыпание, самозатачивание, затупление), температуры шлифования, шероховатости шлифованной поверхности и других.

Изучение характера взаимодействия ШК с заготовкой и динамики изменения параметров процесса позволит с большей степенью достоверности прогнозировать показатели и результаты шлифования, обоснованно осуществлять корректировку режима работы инструмента, в соответствии с изменившимися условиями обработки и приоритетами оптимизации.

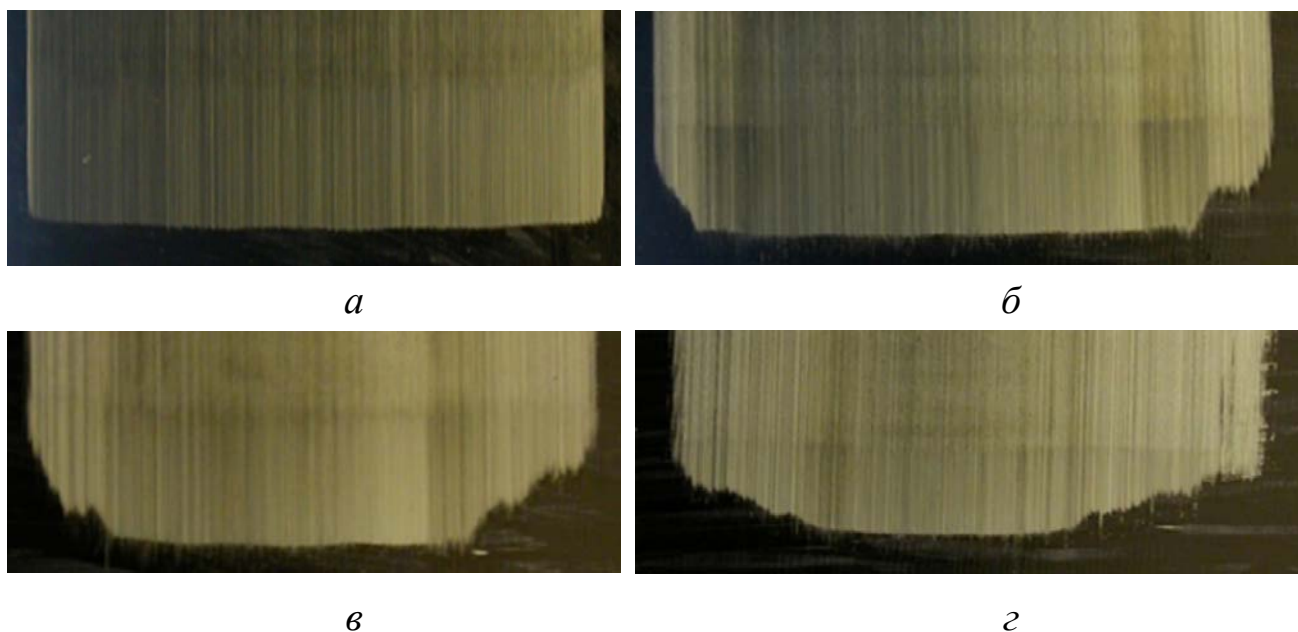
Основной целью проведенных исследований было изучение характера зависимости площади (F) поверхности контакта РП инструмента и заготовки от изменения значимых факторов операции шлифования и получение базовых расчетных математических моделей [11].

Изменение формы РП в процессе работы ШК изучалось в ходе проведения физического эксперимента по испытанию инструмента в соответствии с разработанной методикой. Эксперимент проводился на станке модели 3Е711ВФ3 по схеме плоского многоходового шлифования периферией круга с поперечной подачей. Характеристики ШК: 1 250x20x76 25AF60K8V. Шлифуемый образец: сталь ХВГ (размеры обрабатываемой поверхности 99x42 мм, твердость HRC 62). Режимы шлифования: скорость круга $V_{кр} = 36,6$ м/с, продольная подача $S_{прод} = 0,15$ м/с, поперечная подача $S_{поп} = 2$ мм/ход, глубина шлифования $t = 0,04$ мм.

В шпиндель плоскошлифовального станка модели 3Е711ВФ3 устанавливался ШК, РП которого правилась алмазным карандашом. Шлифуемый образец из закаленной стали с зачерненной поверхностью закреплялся в динамометре модели УДМ-100, установленном на рабочем столе станка. Профиль РП ШК фиксировался на специально подготовленном образце, после правки и после определенного числа поперечных ходов рабочего стола станка в каждом направлении. Фиксация формы профиля осуществлялась врезанием круга в поверхность

образца на всю его высоту с глубиной 0,05–0,06 мм, несколько превышающей глубину шлифования, посредством продольной подачи ($S_{прод}=0,017$ м/с). После очередной фиксации профиля РП шлифование возобновлялось без правки инструмента.

Примеры изображений следов профилей РП ШК с различной степенью износа, полученных фотографированием образцов цифровой камерой с разрешением матрицы 16 мегапикселей и 4-кратным оптическим увеличением, приведены на рисунке 1.11.



*а – ШК после правки; б – ШК после 2 поперечных ходов;
в – ШК после 20 поперечных ходов; г – ШК после 80 поперечных ходов*

Рисунок 1.11 – Изображения следов профиля РП с различной степенью износа ШК

Результаты проведенного эксперимента позволили оценить изменение формы профиля РП инструмента и установить, что окончательная стабилизация изменения формы профиля РП наступила после 80 поперечных ходов (рисунок 1.10 г) рабочего стола станка в каждом направлении.

Анализ изображений следов профилей позволил выявить и представить в виде геометрических моделей характерные формы РП, соответствующие определенной степени износа ШК.

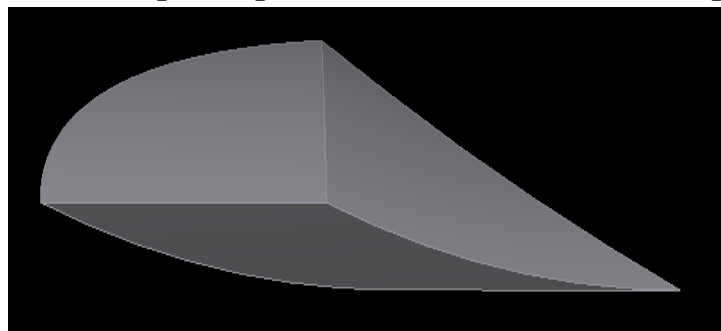
Дальнейшие исследования проводились с использованием разработанной методики компьютерного моделирования с использованием инженерных программных комплексов “Inventor” и “SolidWorks” [11; 12]. Мо-

делирование ПК осуществлялось для схем плоского и круглого наружного шлифования периферией ШК прямого профиля с поперечной (осевой) подачей. Изменяемое при моделировании ПК факторное пространство процесса шлифования состояло из следующих элементов: диаметр ШК $D_{кр}$, радиус износа РП ШК в осевом сечении R , диаметр обрабатываемой заготовки $D_з$, поперечная (осевая) подача заготовки или инструмента S_{non} . Значением R ($0 \leq R \leq R_{max}$) задавалась величина «заборного конуса», образующегося на РП ШК в процессе шлифования.

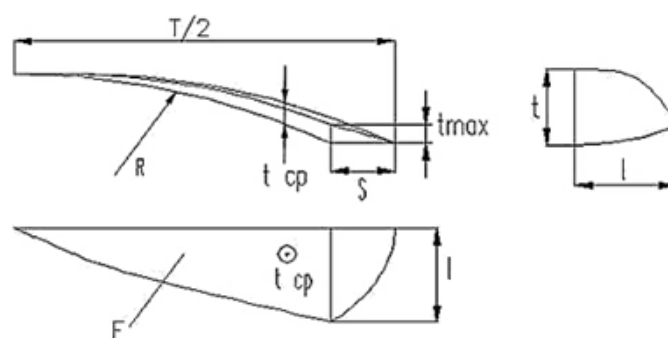
Параметрическое моделирование ПК при взаимодействии ШК с заготовкой осуществлялось в следующем порядке:

1 Задание формы, размеров и координат взаимного расположения в пространстве 3D моделей ШК и цилиндрической (плоской) поверхности заготовки, соответствующие схемам круглого наружного и плоского шлифования с осевой подачей инструмента (заготовки), заданному режиму обработки.

2 Выделение общего объема пересечения ШК с заготовкой и определение геометрических параметров площади их контакта (рисунок 1.12).



a



б

a – выделение пересечения объемов ШК и заготовки; *б* – проекции поверхности контакта с определенными геометрическими параметрами

Рисунок 1.12 – Иллюстрации определения объема пересечения ШК с заготовкой

3 Обработка результатов моделирования и представление полученных данных (рисунок 1.13).



а – неизношенный ШК; б – изношенный ШК

Рисунок 1.13 – Примеры компьютерных моделей изображений поверхностей контакта с заготовкой (вид со стороны оси вращения круга)

Полученные в ходе моделирования без учета влияния упругих и тепловых деформаций данные, позволили получить математическую модель для определения площади контакта F , мм² [4]:

$$F = F_0 \times \left(1 + \frac{0,12 \times T \times R_{\delta}^{0,41}}{S_{\text{ноп}}} \right), \quad (1.1)$$

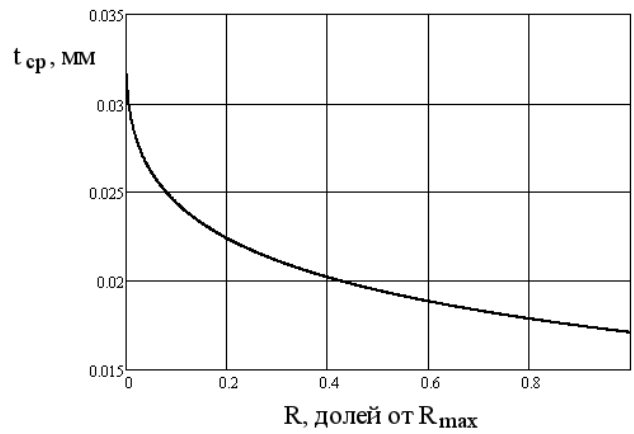
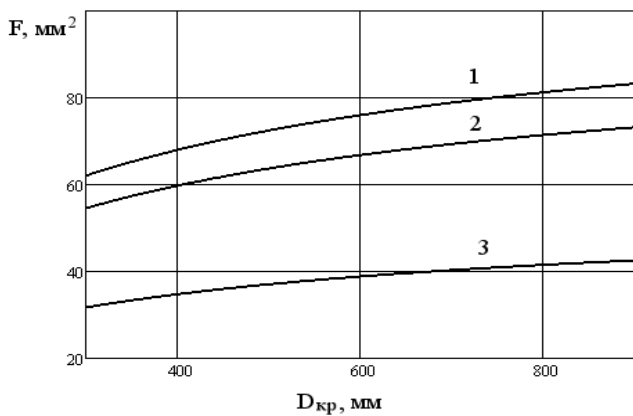
где F_0 – начальная площадь поверхности контакта, при $R=0$ ($F_0 = l \cdot S_{\text{нр}}$ где l – длина дуги контакта ШК с заготовкой), мм²; T – высота круга, мм; R_{δ} – текущий радиус износа в долях от максимального ($R_{\delta} = (R_{\text{max}} - R)/R_{\text{max}}$); $R_{\text{max}} = (t^{17}(T/2)^2)/2t$.

Во всех нижеследующих формулах значения параметров $D_{\text{кр}}$, D_z , T , R , R_{max} , t , t_{cp} следует подставлять в миллиметрах; значение $S_{\text{ноп}}$ в миллиметрах на оборот заготовки (ход рабочего стола); значения $V_{\text{кр}}$ и V_z в метрах в секунду.

С использованием зависимости (1.1) можно рассчитать среднюю глубину резания по поверхности контакта t_{cp} по формуле:

$$t_{\text{cp}} = 0,667 \times t \times \frac{F_0}{F}, \quad (1.2)$$

Графики зависимостей, построенных с использованием полученных математических моделей (1.1) и (1.2), приведены на рисунке 1.14.



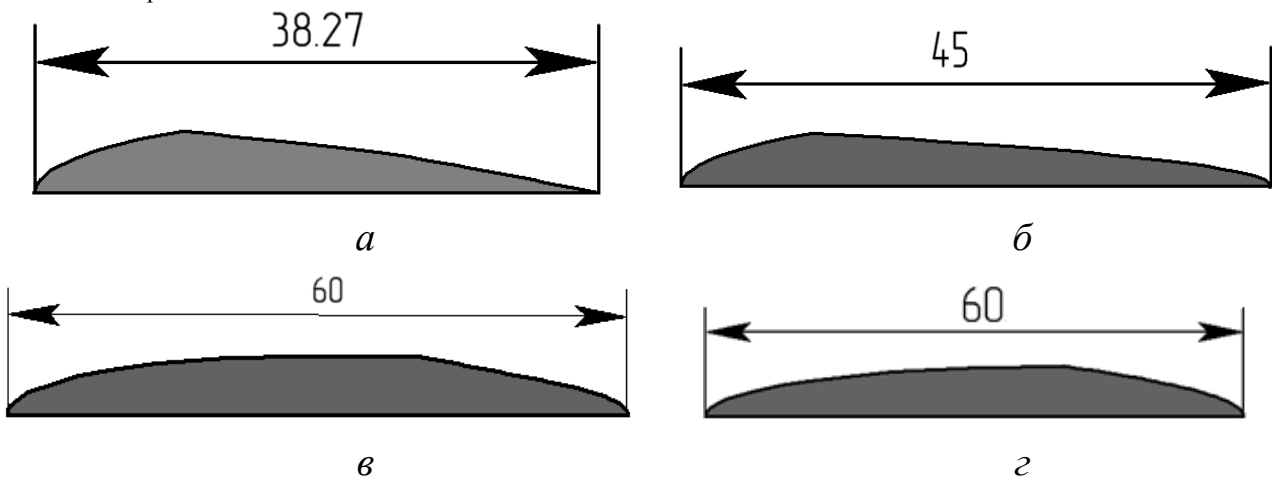
a

б

a – зависимость F от $D_{кр}$ (1 – $R=R_{max}$; 2- $R=0,5 \times R_{max}$; 3 - $R=0$);
б – зависимость $t_{ср}$ от R ($S_{non}=10$ мм/об. з., $t=0,05$ мм, $T=80$ мм,
 $D_3=600$ мм, $D_{кр}=900$ мм)

Рисунок 1.14 – Графики полученных зависимостей

Результаты исследований были использованы при назначении оптимальных режимов обработки и их корректировке на различных операциях шлифования. Примеры смоделированных поверхностей контакта для операций шлифования «бочек» и «шеек» прокатных валков (ОАО «УЗТМ», г. Екатеринбург) и график изменения площади контакта F от диаметра круга $D_{кр}$ и заготовки валка D_3 приведены на рисунках 1.15 и 1.16.



а

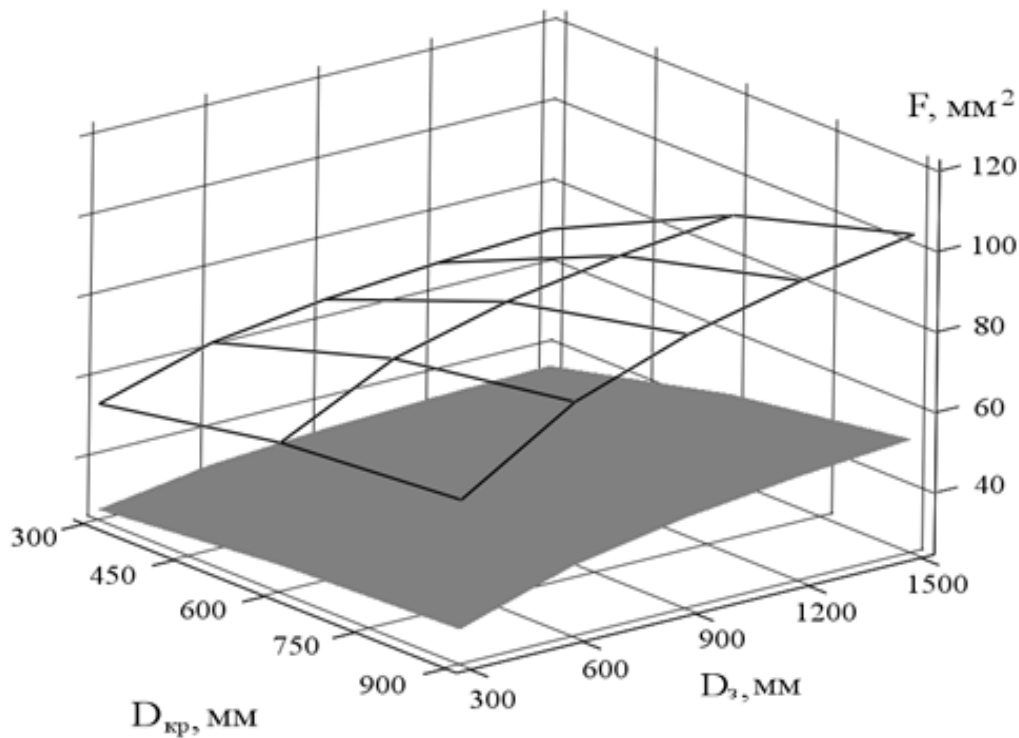
б

в

г

a – $R = 0,5 \times R_{max}$, $S_{non} = 10$ мм/об. з.; *б* – $R = R_{max}$, $S_{non} = 10$ мм/об. з.;
в – $R = 0,5 \times R_{max}$, $S_{non} = 40$ мм/об з.; *г* – $R = R_{max}$, $S_{non} = 40$ мм/об. з

Рисунок 1.15 – Изображения смоделированных поверхностей контакта ШК с заготовкой для операции шлифования «бочки» прокатного валка (вид со стороны оси вращения круга; круг 1 900×80×305, $D_3=1800$ мм, $t=0.05$ мм)



$S_{\text{non}}=10$ мм/об. з., $t=0,05$ мм, $T=80$ мм, $R=0$ (нижний график) и $R=R_{\text{max}}$ (верхний график)

Рисунок 1.16 – Зависимость F от $D_{\text{кр}}$ и $D_{\text{з}}$ для схемы круглого наружного шлифования

Результатом исследований, описанных в данном разделе, стало установление математической зависимости изменения F от режимов обработки и геометрических параметров ШК и заготовки, на основе которой была разработана методика сохранения режима работы инструмента и показателей качества обработки.

Разработанная статистико-вероятностная силовая модель режима работы инструмента положена в основу системы автоматизированного проектирования режимно-инструментального оснащения процесса шлифования [13; 14].

1.4 Проектирование режимно-инструментального оснащения операций шлифования с использованием специализированной САПР «ШЛИФДИЗАЙН»

Значительная доля операций шлифования в технологических процессах обработки материалов резанием и высокие требования к эксплуатационным показателям инструмента предполагают использование в данной области средств информационного и программного обеспечения, по-

вышающих качество проектирования и производительность труда инженерно-технических работников. На российском рынке технологических САПР подобные специализированные программные продукты, используемые при проектировании, изготовлении и применении абразивного инструмента, практически не представлены [1; 14]. Это обусловлено отсутствием достоверных сведений о процессе шлифования, адекватных вероятностных моделей рабочей поверхности инструмента и ее взаимодействия с заготовкой, созданных на их основе универсальных многофакторных математических зависимостей. Технологические разделы известных САПР обладают недостаточными информационными ресурсами и не позволяют проводить расчеты характеристик инструмента и режимов его работы.

Система расчета режимов резания, описание которой приведено на официальном сайте компании «АСКОН», функционирует в среде САПР технологических процессов ВЕРТИКАЛЬ (рисунок 1.17) и предназначена для расчета режимов обработки, основного (машинного) и вспомогательного времени на основной переход.

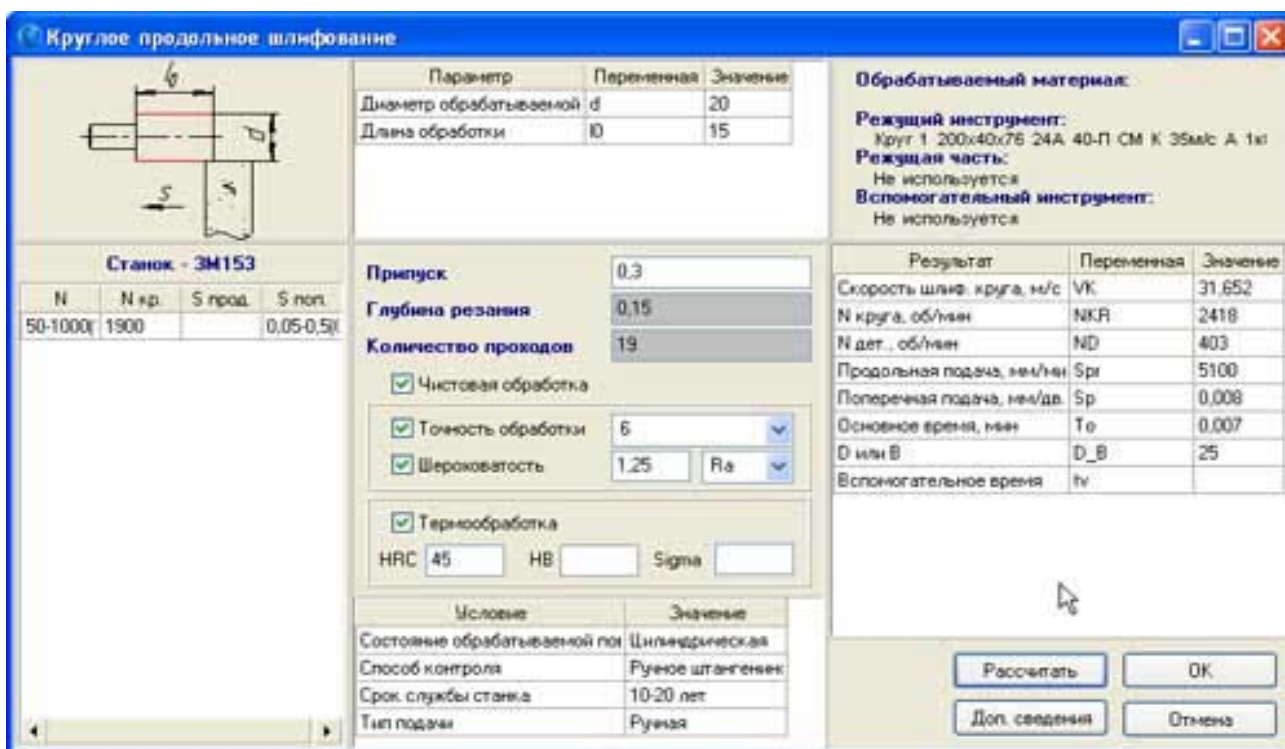


Рисунок 1.17 – Интерфейс системы расчета режимов резания

В основе алгоритмов применены методики расчета режимов резания из справочников. Рекомендуемые нормативы режимов резания позволяют

выбрать подачу, глубину резания, скорость резания в зависимости от точности и качества обрабатываемых поверхностей, заданного эксплуатационного ресурса и необходимой производительности. Таблицы нормативов режимов резания и расхода режущего инструмента в сочетании с математическими моделями и алгоритмами сводят к минимуму необходимые расчеты и позволяют облегчить труд технолога.

Расчет осуществляется для следующих видов обработки: фрезерная обработка, токарная обработка, обработка отверстий осевым инструментом, нарезание резьбы, обработка зубчатых профилей, шлифование, разрезка на ленточно-отрезных и ножовочных станках. В зависимости от вида обработки изменяется и набор рассчитываемых параметров: подача и число оборотов шпинделя, скорректированные по паспорту станка, скорость резания, сила резания, мощность резания и энергозатраты.

При расчете учитываются тип и геометрия обрабатываемого конструктивного элемента, жесткость системы «Станок-приспособление-инструмент-деталь», физико-механические свойства материала и состояние поверхностного слоя заготовки, паспортные данные станка и параметры режущего инструмента.

Для назначения режимов шлифования используются таблицы для выбора режимов резания из «Справочника шлифовщика» [15] без использования расчетных методик. Конструкторские и технологические САПР в абразивных производствах также отсутствуют. Таким образом, создание программных средств для проектирования технологий и инструмента для шлифования является актуальной задачей.

С целью решения проблемы автоматизации проектирования шлифовальных операций разработана САПР, состоящая из 3-х разделов: информационного, раздела проектирования операций алмазно-абразивной обработки и раздела подготовки производства абразивного инструмента, описание которых приведено ниже.

1.4.1 Информационный раздел

Данный раздел позволяет использовать базу данных для оперативного получения пользователем необходимой для проектирования информации. Раздел содержит сведения: о ГОСТах; о предприятиях-изготовителях алмазно-абразивного инструмента и оборудования; об основных видах абразивного инструмента, их маркировке, области применения; о шлифо-

вальных и обрабатываемых материалах; об оборудовании для алмазно-абразивной обработки и производства алмазно-абразивного инструмента; о типовых операциях и рекомендации по выбору характеристик инструмента и режимов шлифования.

Вся информация структурирована, находится, на сервере САПР и других интернет ресурсах, доступных по имеющимся в подразделах гиперссылкам. Имеется так же поисковая система раздела.

На рисунке 1.18 приведена главная страница сайта САПР «ШЛИФ-ДИЗАЙН».

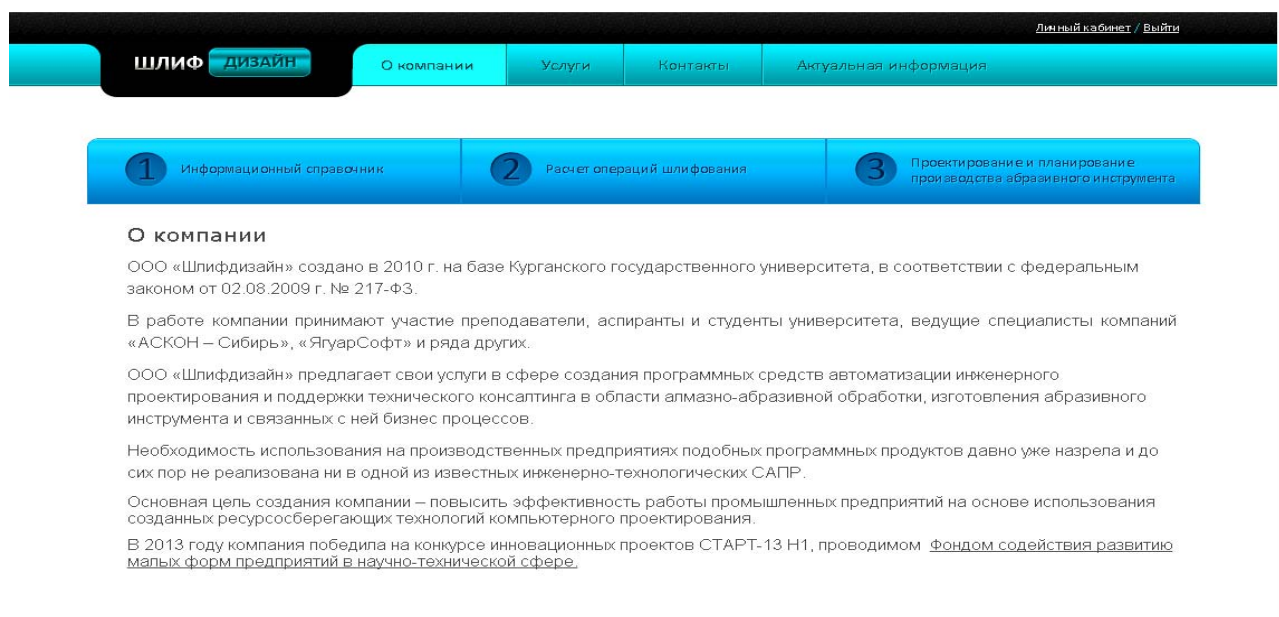


Рисунок 1.18 – Главная страница сайта специализированной САПР «ШЛИФДИЗАЙН»

На странице доступа к информационному разделу (базе данных) САПР (рисунок 1.19) пользователь может:

- оперативно получать необходимую информацию о производителях инструмента;
- определять рекомендуемые характеристики инструмента и режимы обработки, используя справочники и известные стандартные технологические процессы;
- выбирать станочное оборудование, технологическую оснастку, контрольное оборудование и приборы для оснащения шлифовальных операций;
- подбирать аналоги отечественного инструмента взамен импортного;
- получать актуальную научно-практическую информацию и др.

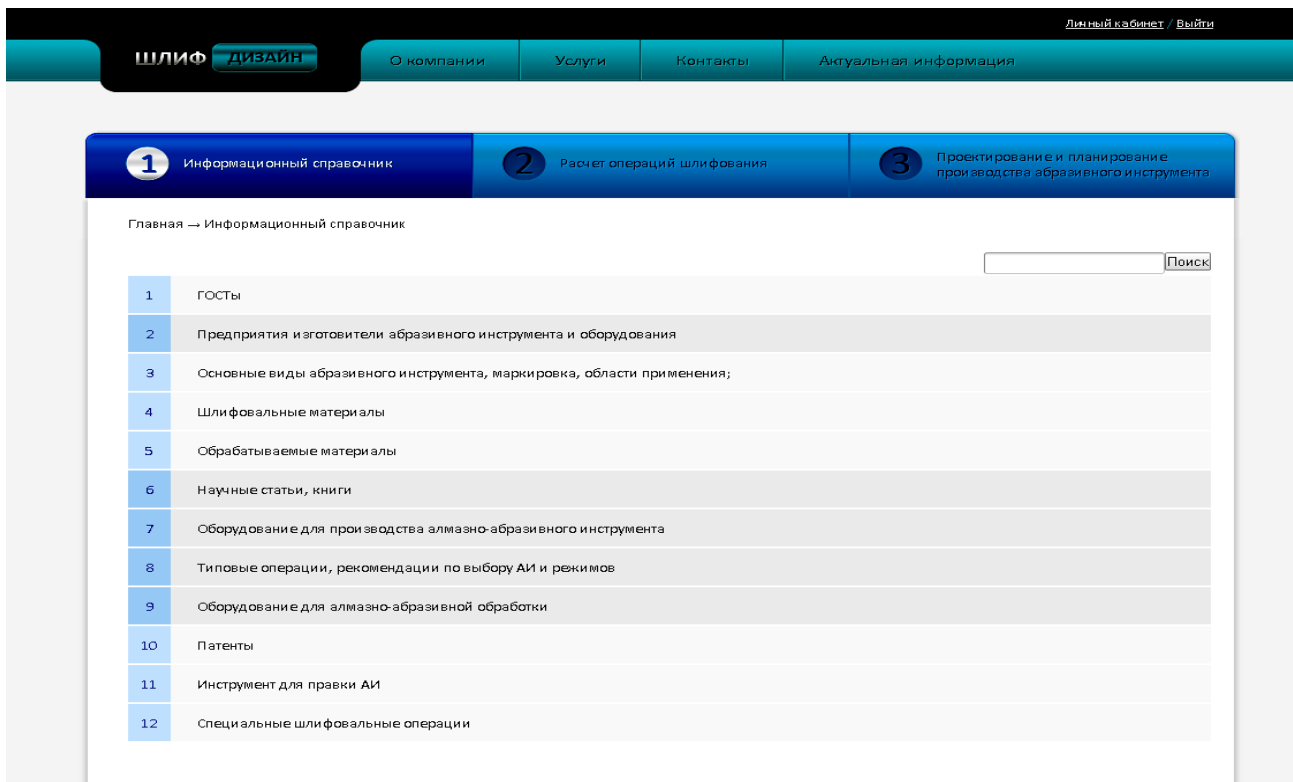


Рисунок 1.19 – Страница информационного раздела САПР

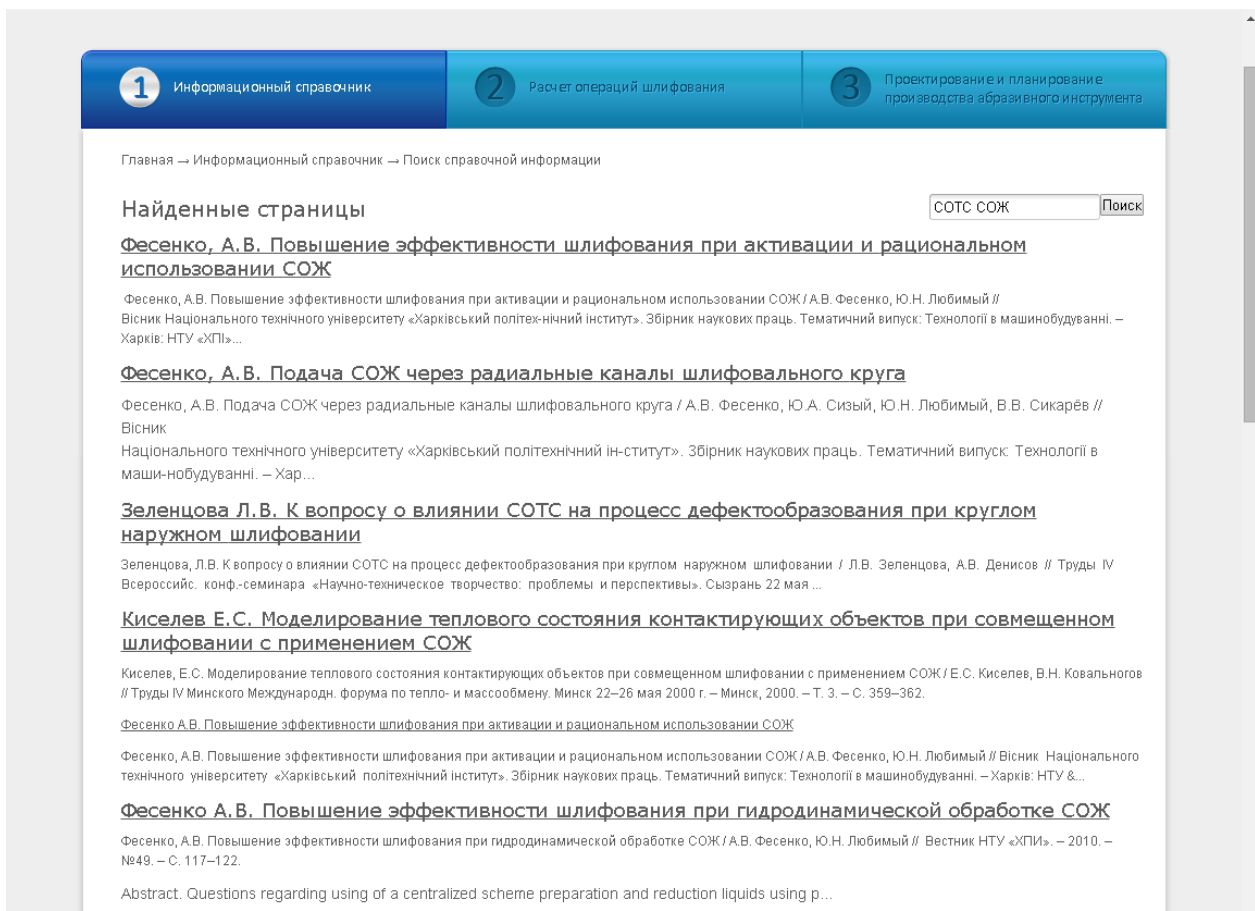


Рисунок 1.20 – Пример поиска по статьям информационного раздела

Содержание подразделов первого раздела САПР и их объем позволяют получить до 90-100% от общего объема необходимой информации без обращения к другим источникам и, тем самым, значительно сэкономить временные и кадровые ресурсы. Содержание раздела постоянно актуализируется.

В системе реализована возможность текстового поиска по статьям раздела. На рисунке 1.20 приведен пример страницы с результатами поиска.

1.4.2 Раздел проектирования операций

Использование раздела позволяет автоматизировать расчет и оптимизацию структурных характеристик абразивного инструмента и режимов шлифования, с учетом требований к производительности и качеству обработки, условий шлифования, имеющихся ограничений и приоритетов оптимизации. Расчет производится с использованием разработанных авторами математических моделей, полученных в результате проведенных лабораторных физических экспериментов, и исследования созданных компьютерных моделей, описанных в предыдущих разделах. Проектирование данного раздела системы осуществлялось с учетом опыта и накопленных знаний ведущих советских, российских и зарубежных ученых.

В настоящее время расчет возможен для 6-ти наиболее распространенных схем обработки плоского многоходового, круглого наружного и внутреннего шлифования с осевой подачей заготовки или инструмента и врезного шлифования периферией шлифовального круга. Еще для 14-ти схем шлифования расчеты доступны в тестовом режиме. Страница выбора требуемой схемы шлифования приведена на рисунке 1.21.

После выбора схемы, осуществляется переход по ссылке на страницу проектирования операции для данной схемы, на которой пользователь заполняет исходные данные, необходимые для проведения расчетов. Конкретный набор параметров зависит от выбранной схемы шлифования.

После заполнения всех параметров необходимо нажать кнопку «Произвести расчет». Введенные пользователем данные отправляются на сервер, на котором и осуществляется расчет показателей процесса шлифования. Результаты расчета отправляются на ПЭВМ абонента и выводятся на экран.

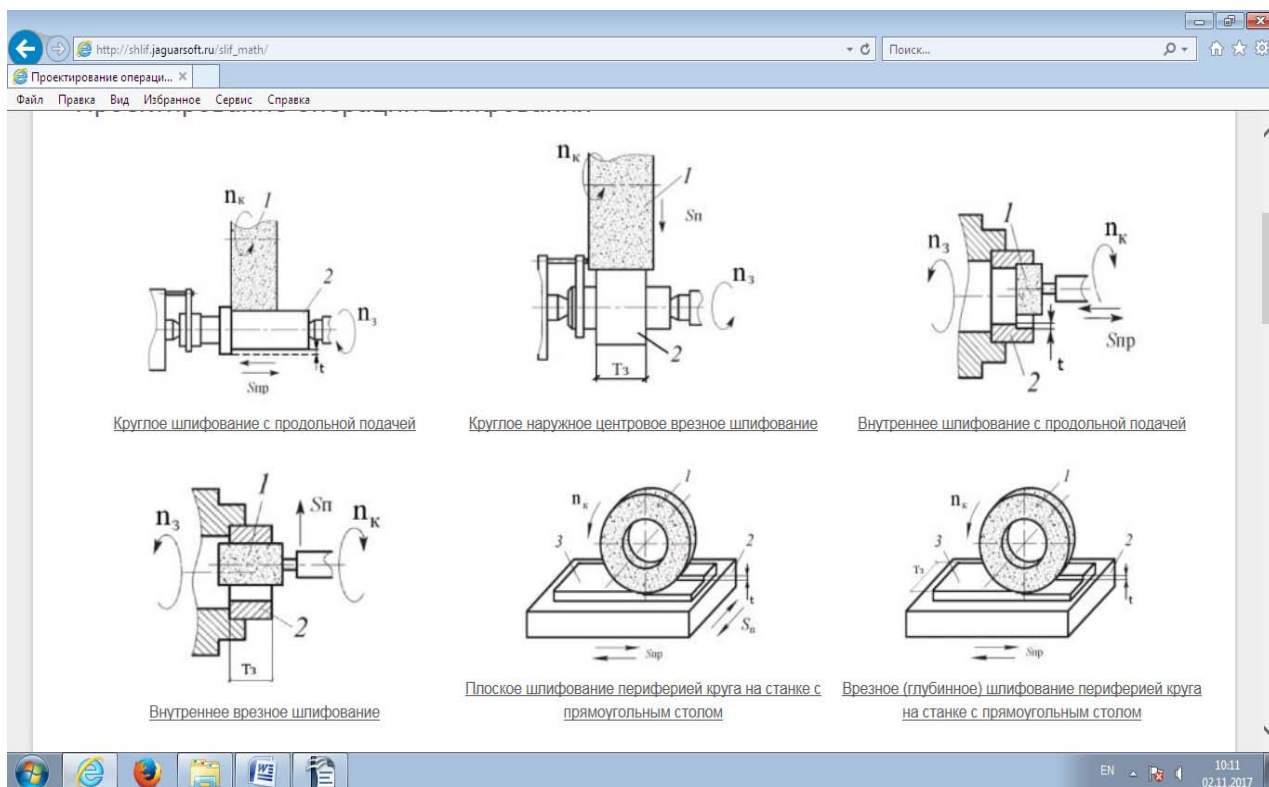


Рисунок 1.21 – Страница выбора схем шлифования

В процессе расчета и проектирования рассчитываются 16 промежуточных и конечных показателей процесса шлифования, в том числе:

- радиус износа (величина «заборного конуса») рабочей поверхности круга;
- длина и площадь его контакта с заготовкой;
- средняя глубина шлифования (с учетом изменения площади контакта);
- поперечное сечение срезаемых зернами стружек, с учетом их перекрытия друг другом в процессе шлифования;
- действующие на зерна силы резания со стороны материала заготовки;
- общее число активных зерен, одновременно находящихся в контакте с заготовкой;
- силы, действующие на единичные режущие зерна P'_p ;
- составляющие силы P_y, P_z результирующей силы шлифования $P_{шл}$.

По величине P_z , рассчитываются крутящий момент на шпинделе инструмента, мощность шлифования и необходимая мощность электродвигателя главного движения, с учетом КПД кинематической цепи привода станка. Определяется режим работы инструмента (осыпание, самозатачи-

вание, затупление), по величине соотношения R'_p и прочности удержания абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, которая зависит от статических характеристик шлифовального круга (номера структуры, объемного содержания и прочности связки, зернистости шлифматериала). С учетом величины осевой подачи инструмента, высоты круга и состояния его рабочей поверхности, рассчитывается шероховатость шлифованной поверхности (R_a).

Нажав кнопку «Экспортировать» можно сохранить введенные данные и результаты расчета в файл на жестком диске.

После расчета основных параметров, у пользователя имеются возможности по получению требуемых (предельных) значений задаваемых и полученных расчетом данных, путем построения графика зависимости оптимизируемого параметра (функция) от фактора оптимизации (аргумент функции).

График строится на заданном интервале изменения выбранного аргумента функции с определенным шагом для любого параметра, с учетом их конгруэнтности, при сохранении других данных проведенного расчета. Используя полученный график, можно определить характер зависимости, область изменения параметра на заданном интервале, локализовать пределы возможного изменения или выявить точное значение аргумента функции, с учетом обеспечения требуемой величины оптимизируемого параметра. Так, например, используя в качестве параметра скорость вращения круга, задав интервал и шаг изменения, можно определить характер зависимости и диапазон возможного изменения параметра (в данном примере – шероховатость шлифованной поверхности R_a).

Повторным расчетом с использованием определенной величины параметра или его возможных значений проверяются измененные результаты расчета на соответствие имеющимся ограничениям. Пример графика оптимизации приведен на рисунке 1.22.

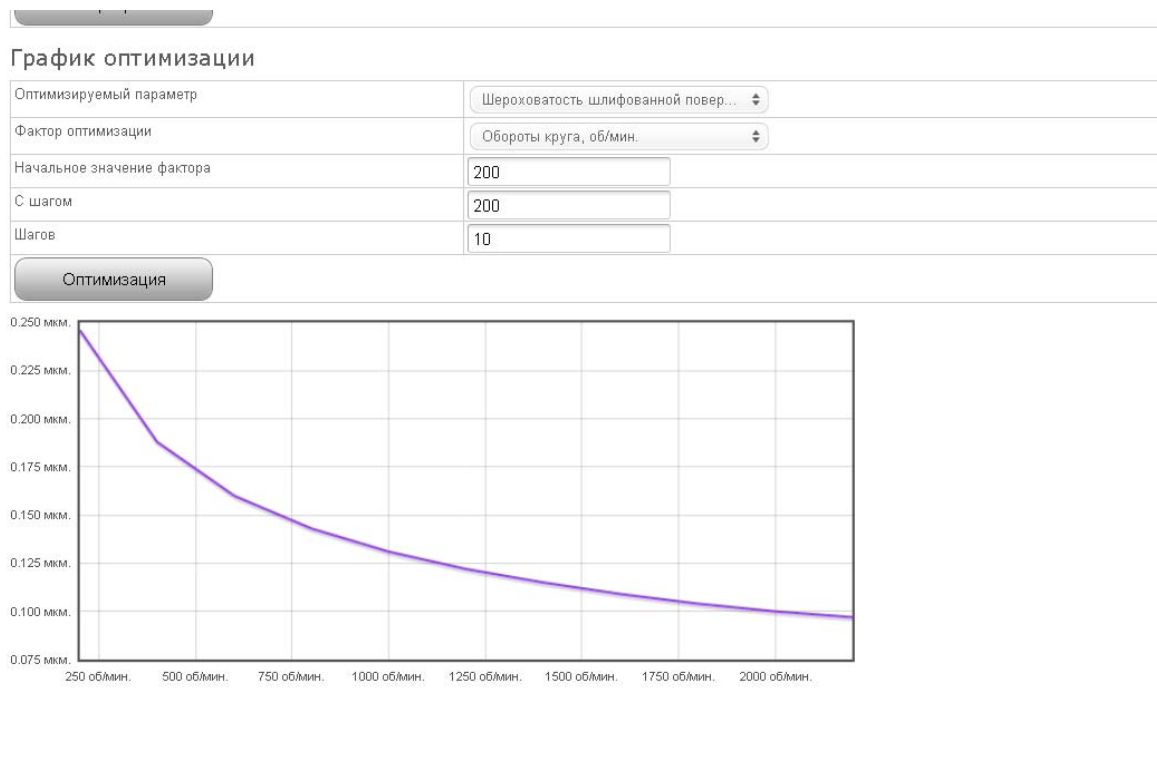


Рисунок 1.22 – Страница ввода данных и пример графика изменения оптимизируемого параметра

1.4.3 Раздел подготовки производства

Раздел позволяет вести автоматизированные расчёты:

- объёмных и весовых частей компонентов абразивной массы для инструмента с заданными характеристиками;
- объёмов формуемых заготовок, с учетом припусков под обработку;
- количества замесов и компонентов абразивной массы на один замес;
- плотности заготовки и готового инструмента;
- количества и стоимость материалов, необходимых для изготовления партии изделий и программы выпуска (смена, месяц, год);
- технологических (количество прессов, пресс-форм, объёмы печей) и кадровых ресурсов;
- себестоимости изготовления изделий с учетом накладных расходов.

Используя возможности данного раздела на абразивных заводах можно сформировать карточки формовщика, внутренние накладные на партию изделий, отчеты о состоянии выполнения заказа и другие документы.

Формат техдокументации и отчетов определяется пользователем САПР. На рисунке 1.23 изображена начальная страница третьего раздела САПР и пример сформированного документа.

ШЛИФ ДИЗАЙН

О компании Услуги Контакты Актуальная информация

1 Информационный справочник 2 Расчет операций шлифования 3 Проектирование и планирование производства абразивного инструмента

Главная → Расчет технико-экономических показателей производства абразивного инструмента

Расчет технико-экономических показателей производства абразивного инструмента

Шлифовальный круг Прессформа

Структура	1
Марка абразивного материала / Обозначение	Карбид кремния зелены...
Масса зерна на один замес	<input type="text"/> кг.
Процент брака изделий	<input type="text"/> %
Норма кругов в смену на одного формовщика	<input type="text"/> шт.
Цена исходных материалов за килограмм	
Цена килограмма зерна	<input type="text"/> руб/кг.
Цена килограмма связки	<input type="text"/> руб/кг.
Цена килограмма наполнителя	<input type="text"/> руб/кг.
Цена килограмма жидкого стекла	<input type="text"/> руб/кг.
Цена килограмма декстрина	<input type="text"/> руб/кг.
Объемы материалов в единичном объеме инструмента	
Доля зерен	<input type="text"/>
Доля связки	<input type="text"/>
Доля наполнителя	<input type="text"/>

Рисунок 1.23 – Фрагмент страницы ввода данных для расчета данных технологической документации и показателей производства абразивного инструмента

1.4.4 Рекомендации по применению САПР «ШЛИФДИЗАЙН» на машиностроительном предприятии

Работа сайта САПР осуществляется на основе программного обеспечения веб-сервиса, написанного на языке PHP 5.3 с использованием фреймворка CodeIgniter 2.0.2. Используемые в работе с программой данные, управляются и хранятся в СУБД MySQL. Интерфейс пользователя САПР разработан с учетом предполагаемого деления всех абонентов на группы с разными правами доступа. Работа с программой ведется в интерактивном режиме. Входя в программу, в зависимости от группы доступа, пользователь видит набор доступных ему разделов сайта (1-го, 2-х или всех 3-х) и получает доступ к их веб-сервисам. Группы пользователей мо-

гут иметь доступ одновременно в несколько разделов сайта и параллельно осуществлять расчеты и поиск информации в любом из разделов. Процесс проектирования основывается на обработке входных данных с использованием ресурсов сервера и выводом на экран полученных результатов в определенном формате.

Вышеописанные разделы САПР являются исходной программной платформой, которая имеет перспективу расширения за счет разработки новых функциональных блоков, расширения баз данных и интерфейсов. Внедрение САПР на конкретном предприятии потребует адаптации всех разделов системы под конкретные задачи потребителя.

Использование САПР позволяет:

- повысить эффективность проектирования шлифовальных операций за счет повышения компетентности специалистов в области последних достижений проектирования, применения и производства инструмента и применения научного подхода к решению задач планирования и проектирования;

- обеспечить эффективное взаимодействие между разработчиками, потребителями и изготовителями абразивного инструмента при использовании единой базы данных;

- сократить затраты на абразивный инструмент до 2-х и более раз, повысить производительность и качество обработки до 400 %.

Благодаря интеграции различных разделов САПР, создано единое информационное пространство, обеспечивающее возможности сквозного проектирования: информационное обеспечение - разработка инструмента – проект операции обработки – подготовка производства инструмента. Такой подход к проектированию позволяет оперативно находить и применять наиболее эффективные решения на всех этапах жизненного цикла созданного проекта и/или изделия. Подход полностью себя оправдал при решении задач повышения эффективности существующих технологических операций на ряде ведущих предприятий РФ.

САПР разработана при участии ученых Курганского госуниверситета, ведущих специалистов компаний «АСКОН-Комплекс» и «ЯгуарСофт» (г. Курган). Сайт САПР располагается на электронном адресе в сети Интернет: <http://shlif.jaguarsoft.ru>.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Какие основные задачи решаются в ходе исследований процесса шлифования?
- 2 Что собой представляет вероятностная модель рабочей поверхности шлифовального круга?
- 3 Опишите вероятностную кинематическую модель процесса шлифования.
- 4 Опишите принципы моделирования структуры абразивного инструмента.
- 5 Поясните цели и суть 3D моделирования поверхности контакта инструмента с заготовкой.
- 6 В чем заключаются преимущества расчетных методов проектирования характеристик инструмента и режима операции шлифования?
- 7 Какими преимуществами обладают системы автоматизированного компьютерного проектирования перед другими методами?
- 8 Какие известные технологические САПР применяются при проектировании операций обработки?
- 9 Опишите структуру и функциональные возможности САПР «Шлифдизайн».
- 10 Какую информацию содержит информационный раздел системы проектирования САПР «Шлифдизайн»?
- 11 Как осуществить расчет оптимальных значений элементов режима шлифования и статических характеристик инструмента?
- 12 Как выполнить расчет основных показателей производства абразивного инструмента?
- 13 В чем заключается понятие «сквозное проектирование»?
- 14 Опишите порядок доступа к веб-сервису САПР «Шлифдизайн».

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА МАТЛАВ

2.1 Применение модели Лоренца для исследования устойчивости процессов

Устойчивое функционирование технологических систем в целом, определяющее качество и точность изготовления деталей определяется характером протекающих в системе процессов. Для оценки динамических свойств технологическую систему процесса резания будем рассматривать как совокупность взаимосвязанных нелинейных динамических подсистем с прямыми и обратными связями.

В литературе [16; 17; 18] описаны подходы к моделированию динамических процессов, происходящих в технологической обрабатывающей системе. Чаще всего информация об этих процессах представлена в виде временных рядов, исследование которых проводится с учетом представления технологической системы в виде нелинейной динамической системы. Такая система задается определенным набором динамических переменных, характеризующих ее состояние. Значения динамических переменных в любой последующий момент времени получаются из исходного набора по определенному правилу [17].

Установлено, что в большинстве случаев технологическая система работает в неустойчивом режиме [19], который характеризуется нарастанием возмущения при незначительном воздействии. Однако, в силу ограниченности энергетических ресурсов системы, нарастание амплитуды со временем прекращается или сменяется уменьшением амплитуды отклонения, что соответствует хаотическому режиму функционирования динамических систем. Математическим образом режима функционирования диссипативной динамической системы служит аттрактор – область, которая притягивает к себе траектории движения точек в фазовом пространстве [20].

Технологическую систему обработки резанием можно рассматривать как совокупность механической подсистемы (станок) с трибосредой (контакт резца с обрабатываемой деталью – трибоконтат). При относительном перемещении отдельных элементов механической системы на поверхности их контакта возникают силы трения, препятствующие этому перемещению, а технологическая система становится трибосистемой. В

процессе резания устойчивое движение упругой системы станка нарушается биениями, периодическим изменением амплитуды автоколебаний и переходом к хаотическому движению. В системе происходит изменение свойств трибосреды, формируемой в результате работы сил упругости при заданной мощности. Анализ механизма формирования динамических структур в трибосистеме позволил высказать предположение об общности свойств динамических систем природы в целом [21]. В этом случае система Лоренца [22] характеризует один из сценариев изменения координат состояния системы во времени.

В рассматриваемой трибосистеме резания материальной точкой будем считать точку соприкосновения резца с обрабатываемой деталью. При ее отклонении от положения равновесия возникают следующие силы: сила упругости, сила вязкого сопротивления демпфера и сила «сухого» трения.

Сила упругости, согласно закону Гука, определяется следующей зависимостью:

$$F_{\text{упр}} = -c_0 X, \quad (2.1)$$

где X - смещение материальной точки, c_0 – коэффициент жесткости.

Формула для определения силы вязкого сопротивления демпфера имеет вид:

$$F_{\text{сзон}} = -h_0 \frac{dX}{dt}, \quad (2.2)$$

где dX/dt – скорость материальной точки, h_0 – коэффициент сопротивления среды.

Сила «сухого» трения определяется следующей зависимостью:

$$F_{\text{мм}} = F \left(X, \frac{dX}{dt}, V \right), \quad (2.3)$$

где V – скорость относительного скольжения (задается на станке). Особенность «сухого» трения в том, что при относительной скорости $V=0$ коэффициент трения принимает любое значение от нуля до некоторого максимального значения. При малых значениях V коэффициент трения уменьшается, при увеличении V затем становится постоянным, а при дальнейшем увеличении V может снова возрастать. Нелинейная зависимость коэффициента трения от скорости была установлена еще Кулоном.

С учетом рассмотренных выше сил (2.1-2.3) и на основании второго закона Ньютона $m \frac{d^2 X}{dt^2} = F(X(t))$, где $F(X(t))$ - равнодействующая сил, дей-

ствующих на материальную точку, уравнение системы имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + h_0 \frac{dX}{dt} + c_0 X = F(X, \frac{dX}{dt}, V) + U, \quad (2.4)$$

где X – смещения колебательной точки относительно положения равновесия; dX/dt – скорость смещения точки; d^2X/dt^2 – ускорение колебательной точки; m – масса резца; t – время; h_0 – коэффициент сопротивления демпфера при резании металлов на воздухе; c_0 – коэффициент жесткости трибосреды, $F(X, dX/dt, V)$ – сила трения, которая препятствует затуханию колебаний; V – скорость относительного скольжения, отличная от dX/dt и зависящая от скорости вращения детали; U – внешняя сила, зависящая от глубины резания.

На основании представленной зависимости (2.4) и результатах проведенных исследований диссипативных процессов в системе [23; 24] динамика трибосистемы описывается следующей системой дифференциальных уравнений [25]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + cx = -yx \\ T \frac{dy}{dt} + y = x(k_1 x + k_2 \frac{dx}{dt}) \end{cases}, \quad (2.5)$$

где T – постоянная времени изменения свойств трибосреды; k_1 и k_2 – обобщенные коэффициенты жесткости трибосреды [23; 24].

Первое уравнение в рассматриваемой нами системе (2.5) характеризует изменение сил упругости в трибоконтате в связи с изменениями суммарной динамической жесткости. Силы упругости трибосреды направлены против отклонения системы от положения равновесия, что характеризует знак «минус» в первом уравнении.

Второе уравнение характеризует связь координат с работой и мощностью сил диссипации в трибосистеме. Координата y , характеризующая состояние трибосреды, изменяется по закону:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k_1^{(1)} A + k_2^{(1)} N, \quad (2.6)$$

где T – постоянная времени изменения свойств трибосреды $k_1^{(1)}$, $k_2^{(1)}$ – коэффициенты, имеющие соответственно размерности $[\text{мм}^{-2}]$ и $[\text{с}/\text{мм}^2]$, A – работа силы упругости; N – заданная мощность.

Работу и мощность будем представлять в виде квадратичных форм

$$\begin{cases} A = k_1^{(2)} xx \\ N = k_1^{(2)} x \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (2.7)$$

где $k_1^{(2)}$ также имеет смысл жесткости. Подставляя (2.6) в (2.7), получим эволюционное уравнение изменения свойств трибосреды:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k_1^{(1)} k_1^{(2)} xx + k_2^{(1)} k_1^{(2)} x \frac{dx}{dt} = x (k_1 x + k_2 \frac{dx}{dt}) ,$$

где $k_1 = k_1^{(1)} \cdot k_1^{(2)}$, $k_2 = k_2^{(1)} \cdot k_1^{(2)}$ - обобщенные коэффициенты жесткости трибосреды в вариациях относительно точки равновесия, имеющие размерности $[\frac{\kappa\Gamma}{\text{мм}^3}]$, $[\frac{\kappa\Gamma c}{\text{мм}^3}]$.

Данная система достаточно точно описывается при помощи системы уравнений Лоренца (моделью Лоренца), которая создана при решении задачи моделирования конвективного течения подогреваемой снизу жидкости.

Система уравнений Лоренца – представляет собой трехмерную систему автономных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка вида [22]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma \cdot (x + y) \\ \frac{dy}{dt} = r \cdot x - y - x \cdot z, , \\ \frac{dz}{dt} = x \cdot y - b \cdot z \end{cases} \quad (2.8)$$

где $r = R / Rc$, (R – число Рэлея, а Rc – его критическое значение); σ – число Прандтля; b – постоянная, связанная с геометрией задачи. Исследуя систему численными методами при значениях параметров $\sigma = 10$, $b = 8/3$, $r = 28$, Лоренц обнаружил новый тип поведения траекторий, притягивающийся в фазовом пространстве к некоторому образованию, не имеющему аналогов на плоскости и получившему название «аттрактор Лоренца» [22].

Приведем систему (2.5) к виду системы Лоренца с помощью замены переменных:

$$\begin{cases} z_1 = x \\ z_2 = \frac{k_1}{k_2} x + \frac{dx}{dt} \\ z_3 = y \end{cases} \quad (2.9)$$

преобразуем так:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + m \frac{dx}{dt} \cdot \frac{k_1}{k_2} - m \frac{dx}{dt} \cdot \frac{k_1}{k_2} + m \frac{h}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + m \frac{h}{m} \cdot \frac{k_1}{k_2} x + m \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 x - m \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 x - \frac{k_1}{k_2} hx + cx = -yx$$

подставляя (2.9) в полученное равенство, имеем:

$$m \frac{dz_2}{dt} + m \left(\frac{h}{m} - \frac{k_1}{k_2} \right) \cdot z_2 - \left(\frac{k_1}{k_2} h - c - m \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 \right) \cdot z_1 = -z_3 \cdot z_1.$$

Получим $\frac{dz_2}{dt} = -C_3 z_1 z_3 - C_2 z_2 + C_1 z_1$.

Из второго уравнения (2.7) имеем:

$$z_2 = \frac{k_1}{k_2} z_1 + \frac{dz_1}{dt},$$

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2 - \frac{k_1}{k_2} z_1.$$

Обозначим $C_4 = \frac{k_1}{k_2}$, получим: $\frac{dz_1}{dt} = z_2 - C_4 z_1$,

Из второго уравнения (2.7) с учетом замены имеем:

$$\frac{dz_3}{dt} = \frac{1}{T} (k_2 \cdot z_1 \cdot z_2 - z_3),$$

$$\frac{dz_3}{dt} = \frac{k_2}{T} z_1 \cdot z_2 - \frac{1}{T} z_3.$$

Обозначим $C_5 = \frac{k_2}{T}$ и $C_6 = \frac{1}{T}$, получим $\frac{dz_3}{dt} = C_5 z_1 \cdot z_2 - C_6 z_3$.

В результате получим систему:

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = -C_4 z_1 + z_2 \\ \frac{dz_2}{dt} = C_1 z_1 - C_2 z_2 - C_3 z_1 z_3 \\ \frac{dz_3}{dt} = C_5 z_1 z_2 - C_6 z_3 \end{cases}, \quad (2.10)$$

где, z_1 – характеризует перемещение колебательной точки в пространстве, z_2 – характеризует скорость изменения точки под действием силы упругости, z_3 – характеризует изменение жесткости трибосреды, а коэффициенты $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ принимают выражение:

$$C_1 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{h}{m} - \frac{c}{m} - \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2, \quad C_2 = \left(\frac{h}{m} - \frac{k_1}{k_2} \right), \quad C_3 = \frac{1}{m}, \quad C_4 = \frac{k_1}{k_2}.$$

Порог потери устойчивости данной системы можно определить по следующей формуле:

$$c_{CR} = \frac{hmk_1 + Th^2k_1}{k_2m + k_2Th - 2Tmk_1} \quad (2.11)$$

2.2 Создание математических моделей в программном пакете MATLAB

Система математического моделирования MATLAB (MATrix LAboratory) является наиболее функциональной системой автоматизации математических и научно-технических расчетов. Язык программирования MATLAB относится к классу интерпретаторов и реализован на языке C [27]. Сеанс работы с MATLAB принято называть сессией.

MATLAB предоставляет пользователю большое количество (несколько сотен) функций для анализа данных: матрицы и линейная алгебра; многочлены и интерполяция; математическая статистика и анализ данных; обработка данных; дифференциальные уравнения и другие.

Расширение функциональных возможностей MATLAB осуществляется за счет специальных наборов инструментов (toolbox), которые представляют собой коллекции функций, написанных на языке MATLAB для решения определённого класса задач. Наиболее значимые наборы инструментов, которые используются для исследования технических объектов и систем во многих областях, следующие:

- цифровая обработка сигналов, изображений и данных;
- системы управления – наборы функций, облегчающих анализ и синтез динамических систем, их проектирование и моделирование;
- сбор и анализ экспериментальных данных - наборы функций, позволяющих сохранять и обрабатывать данные, полученные в ходе экспериментов, в том числе в реальном времени и поддерживать широкий спектр научного и инженерного измерительного оборудования.

Кроме того, существуют: функции визуализации и представления данных; средства взаимодействия с внешними программными продуктами; инструменты работы с базами данных; научные и математические пакеты; инструменты для синтеза и анализа нейронных сетей; инструменты для построения и анализа нечётких множеств; инструменты для символьных вычислений.

Вычисления в системе MATLAB R2014b можно выполнять в режиме прямых вычислений без подготовки программы через командное окно

(*Command Window*), данные в процессе работы хранятся в памяти (*Workspace*). Строка ввода помечена знаком `>>` (рисунок 2.1).

Дополнительные графические окна (*Figure*) предназначены для изображения кривых, поверхностей и других графиков.

В командном окне показываются вводимые с клавиатуры числа, переменные, а также результаты вычислений. Имена переменных должны начинаться с буквы. Знак `=` соответствует операции присваивания. Все значения переменных, вычисленные в течение сессии, сохраняются в специально зарезервированной области памяти компьютера (*Workspace*). Командой `clc` можно стереть содержимое командного окна, но содержимое рабочего пространства останется в памяти. Если хранение переменных в текущем сеансе более не требуется, их стирают из памяти компьютера командой `clear` – все переменные, или `clear(имя1, имя2, ...)` – переменные с именами *имя1* и *имя2*. Командой `who` можно вывести список всех переменных, входящих в данный момент в рабочее пространство системы.

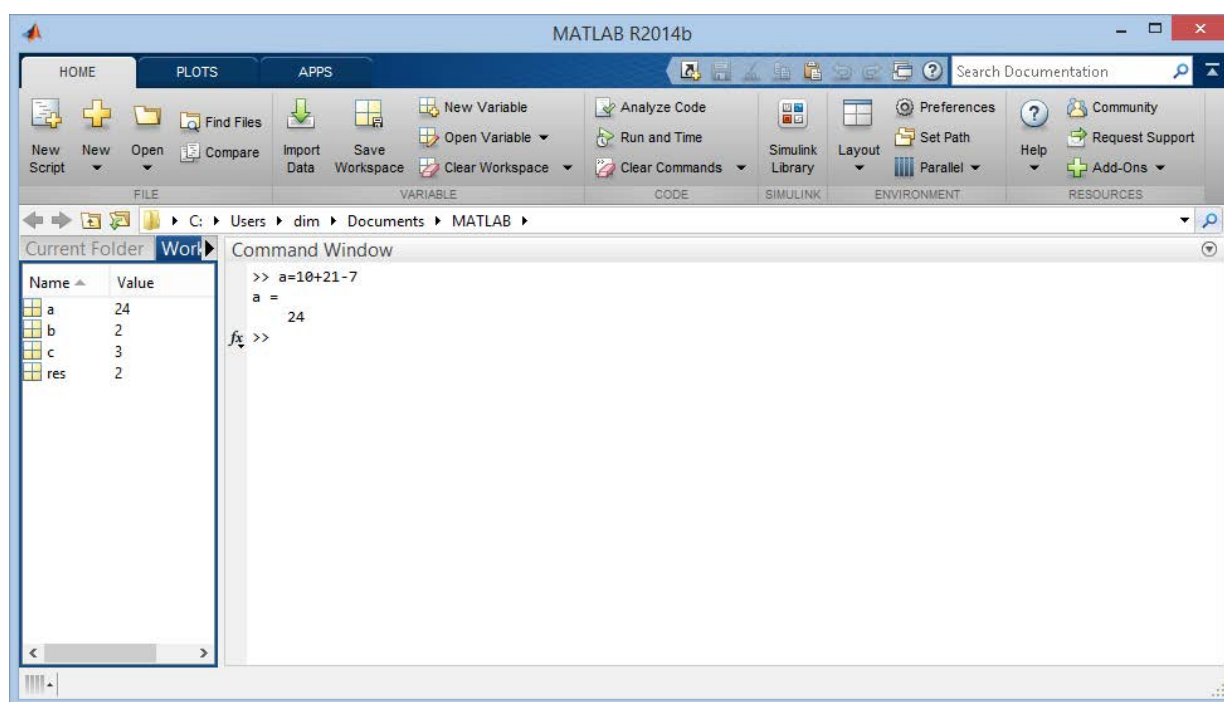


Рисунок 2.1 – Интерфейс системы MATLAB R2014b

Так как после окончания сеанса работы с системой MATLAB все ранее вычисленные переменные теряются, то для сохранения в файле на диске компьютера содержимое рабочего пространства системы MATLAB, нужно выполнить команду меню *File / Save Workspace As ...*. Данный файл будет иметь расширение *mat*.

Для загрузки в память компьютера ранее сохраненного на диске рабочего пространства нужно выполнить команду меню:

File / Load Workspace ...

Ядром интерактивного программного комплекса, предназначенного для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, является пакет Simulink. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и редактор блок-схем и является средством визуально-ориентированного программирования.

Для построения модели системы или устройства в виде блок-схемы пользователь с помощью мыши переносит нужные блоки из набора блоков палитры компонентов на рабочий стол пакета Simulink и соединяет входы и выходы блоков линиями [28]. В состав библиотеки блоков входят: источники сигналов; линейные и нелинейные преобразователи; интегрирующие и дифференцирующие блоки; виртуальные регистрирующие устройства и т. д.

Запуск пакета Simulink, позволяющего визуализировать результаты моделирования, осуществляется нажатием кнопки Simulink в панели инструментов (рисунок 2.2) либо командой `>> Simulink` в командной строке MATLAB.

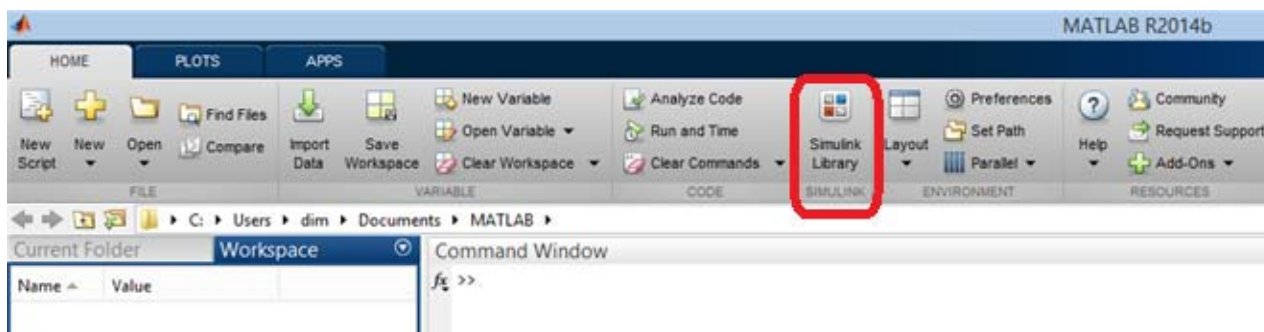


Рисунок 2.2 – Вызов Библиотеки блоков Simulink

При нажатии этой кнопки открывается окно интегрированного браузера библиотек (рисунок 2.3).

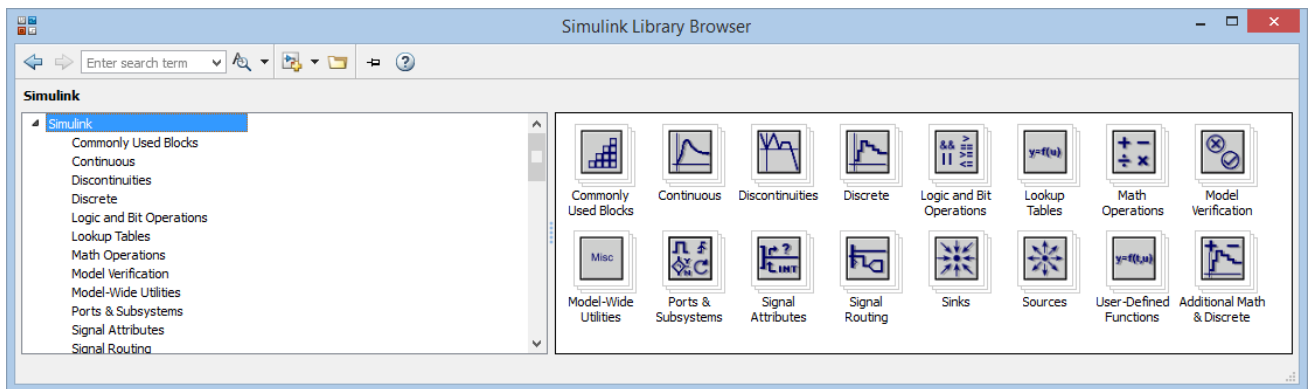


Рисунок 2.3 – Окно браузера библиотек Simulink

В окне браузера содержится дерево компонентов библиотек Simulink, для просмотра разделов которых достаточно выделить нужный мышью, и в правой части окна «Simulink Browser Library» появится набор пиктограмм компонентов активного раздела библиотеки. Для создания новой модели или загрузки существующей можно воспользоваться меню браузера или кнопками на панели инструментов. Окно создания модели вызывается кнопкой Simulink model (рисунок 2.4).

Меню системы содержит следующие пункты:

- File – работа с файлами моделей и библиотек по созданию, сохранению, считыванию и печати;
- Edit – операции редактирования, работа с буфером обмена и создание подсистем;
- View – управление отображением панели инструментов и строки состояния;
- Simulation – управление процессом моделирования;
- Tools – управление видом.

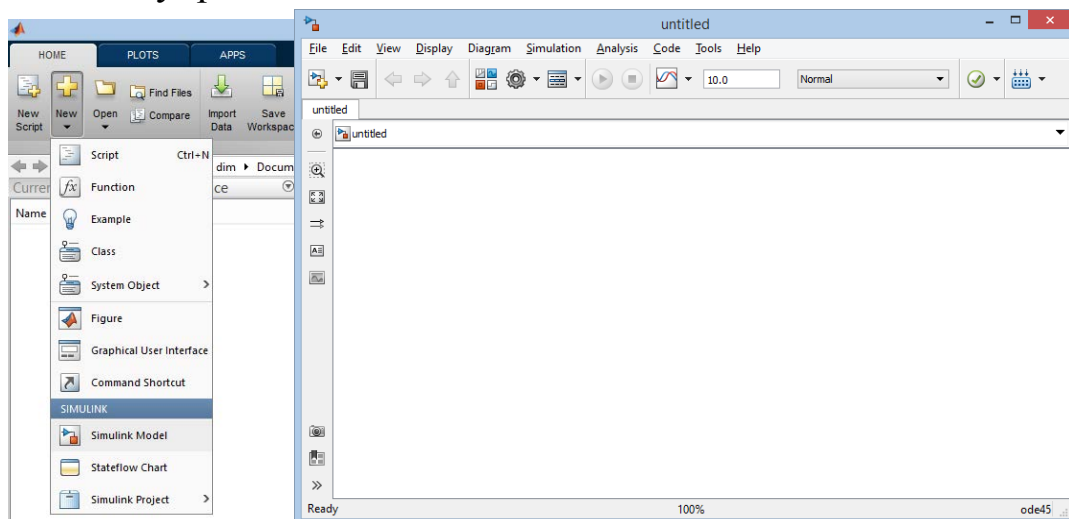


Рисунок 2.4 – Окно вызова окна модели

Для настройки параметров моделирования перед запуском модели используется команда меню «Simulation ⇒ Model Configuration Parameters(Ctrl+E)», после выполнения которой, появляется окно установки параметров моделирования (рисунок 2.5).

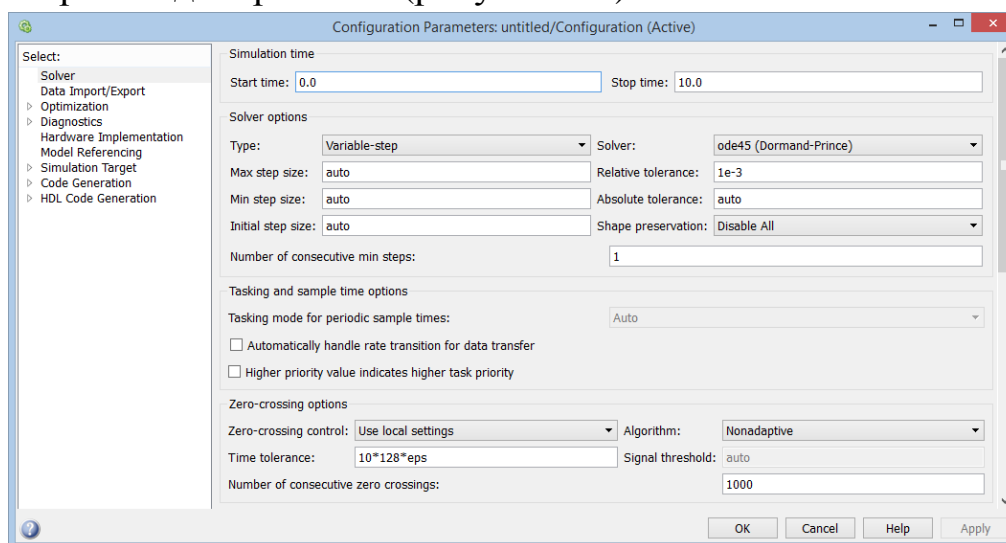


Рисунок 2.5 – Окно установки параметров моделирования

Вкладка «Solver» (Решатель), открываемая по умолчанию, позволяет установить время моделирования «Simulation time», определяющее время модели, в течение которого выполняется моделирование. Время задается начальным временем «Start time» (обычно 0) и конечным временем «Stop time» (по умолчанию 10).

Здесь же устанавливаются две опции решателя в поле «Solver options»: тип решения «Type» (решение с переменным шагом «Variable-step» или решение с фиксированным шагом «Fixed-step») и метод решения «Solver».

Чаще всего, лучшие результаты дает решение с переменным шагом, так как позволяет автоматически подстраивать при изменении скорости получения результатов в процессе моделирования. Метод с фиксированием применяют тогда, когда это вызвано условиями решения задачи в случае исследования поведения системы описываемой монотонными функциями [29].

Выбор метода моделирования, определяет величину и изменение шага в процессе моделирования (рисунок 2.6) и может оказывать решающее влияние на результаты моделирования.

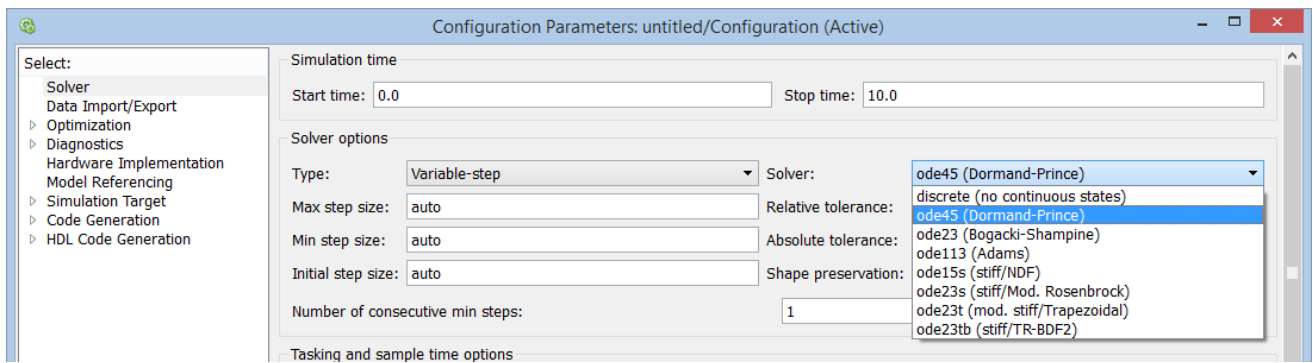


Рисунок 2.6 – Окно выбора метода моделирования

Следующие три параметра обычно задаются автоматически (значения опций «auto»), но в особых случаях их можно ввести явно:

- «Max step size» – максимальный шаг моделирования;
- «Min step size» – минимальный шаг интегрирования;
- «Initial step size» – начальный шаг интегрирования.

Точность моделирования задается относительной погрешностью моделирования «Relative tolerance» и абсолютной погрешностью моделирования «Absolute tolerance» (по умолчанию заданы, соответственно, равными 10^{-3} и 10^{-6}). Если, графики результатов моделирования выглядят фрагментарно, то необходимо уменьшать значения погрешности. Вместе с тем уменьшение погрешности приведет к значительному увеличению времени вычислений.

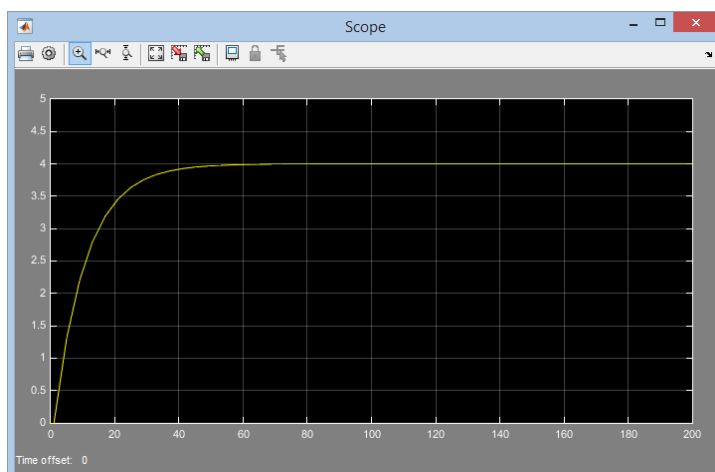
Методика создания модели заключается в последовательном выполнении следующих действий:

- 1) откройте окно новой модели командой меню «File ⇒ New ⇒ Model» (кнопка «Create a new model»);
- 2) из раздела библиотеки «Simulink ⇒ Sources» перенесите в окно модели источник ступенчатого сигнала «Step»;
- 3) из раздела библиотеки «Simulink ⇒ Commonly Used Blocks » перенесите в окно модели нужные блоки;
- 4) из раздела библиотеки «Simulink ⇒ Sinks» перенесите в окно модели блок осциллографа «Scope»;
- 5) выполните соединение между блоками;
- 6) установите время моделирования: «Start time = 0» и «Stop time = 200»;

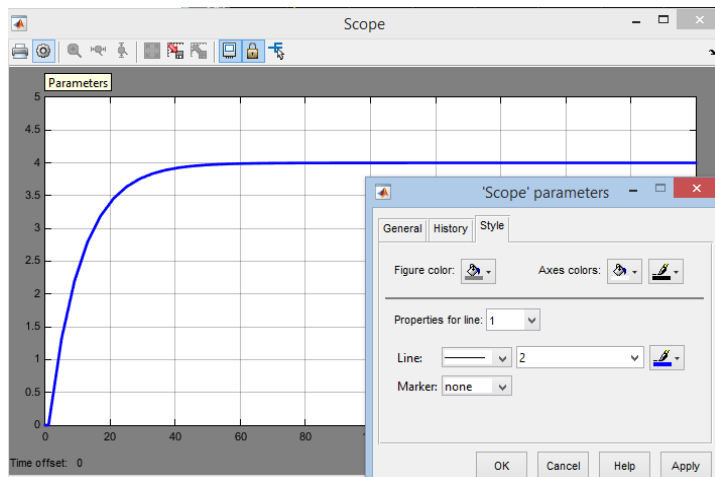
7) запустите модель на исполнение, нажав кнопку «Start Simulation» в панели инструментов окна модели (команда меню «Simulation ⇒ Start»);

8) откройте осциллограф, дважды щелкнув левой кнопкой мыши по блоку «Scope». Для исследования фазового портрета системы используется блок XY-plot из раздела библиотеки «Simulink ⇒ Sinks».

Графики переходных процессов и окно настройки осциллографа приведены на рисунке 2.7.



а



б

а – исходные настройки; б – изменение настроек

Рисунок 2.7 – Графики переходного процесса функции и окно настройки осциллографа

По умолчанию окно моделирования отображается черным цветом. Для изменения настройки изображения щелкните левой кнопкой мыши на кнопке Parameters. В открывшемся окне на вкладке Style можно поменять

цвет фона графика, цвет линий сетки, цвет фона окна, цвет, тип и толщину линии, цвет и тип маркеров (рисунок 2.7 б). Для смены масштаба щелкните правой кнопкой мыши в окне осциллограммы. В появившемся контекстном меню выберите пункт «Axes Properties...». В открывшемся окне свойств осей замените значения $Y_{\min}=-5$ и $Y_{\max}=5$, например, на $Y_{\min}=0$ и $Y_{\max}=5$. В контекстном меню осциллограммы есть также пункт «Autoscale» (Автомасштабирование), устанавливающий масштаб, при котором окно осциллограммы используется полностью. Эта же команда реализуется кнопкой «Autoscale» панели инструментов окна осциллограммы.

2.3 Исследование устойчивости процесса резания металлов с применением MATLAB

Для исследования технологической системы, рассмотренной в разделе 2.1 данного пособия в программном пакете Matlab R2014 была построена модель системы Лоренца для технологической системы (рисунок 2.8), в блоке *value* которой указаны коэффициенты $C_1 - C_6$, а в блоке *Lorenz Technic System* (рисунок 2.9) сама модель. Результаты расчетов выводятся на блок графопостроителя фазовой плоскости XY и XZ.

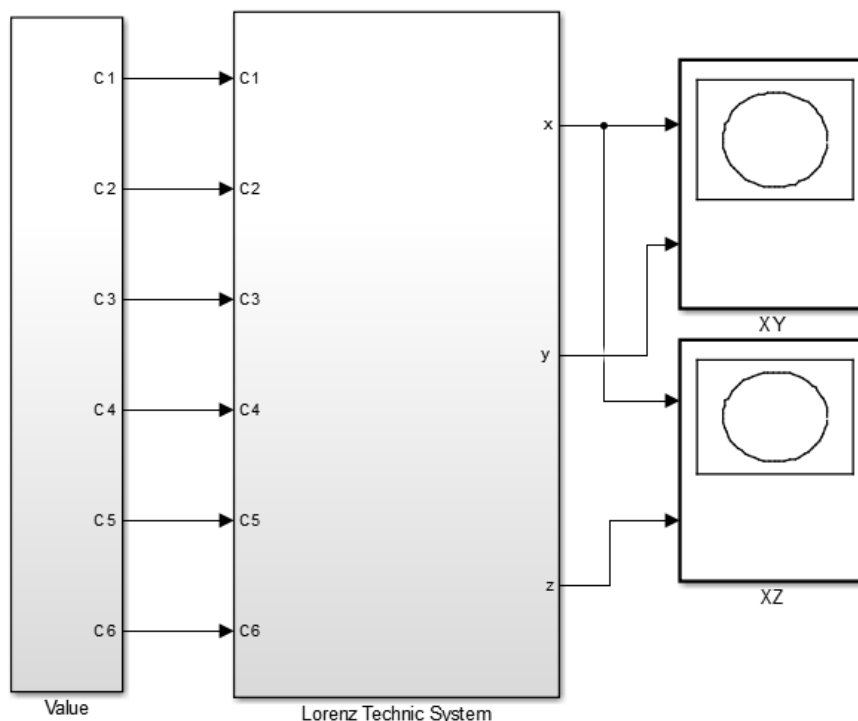


Рисунок 2.8 – Модель Лоренца для технологической системы

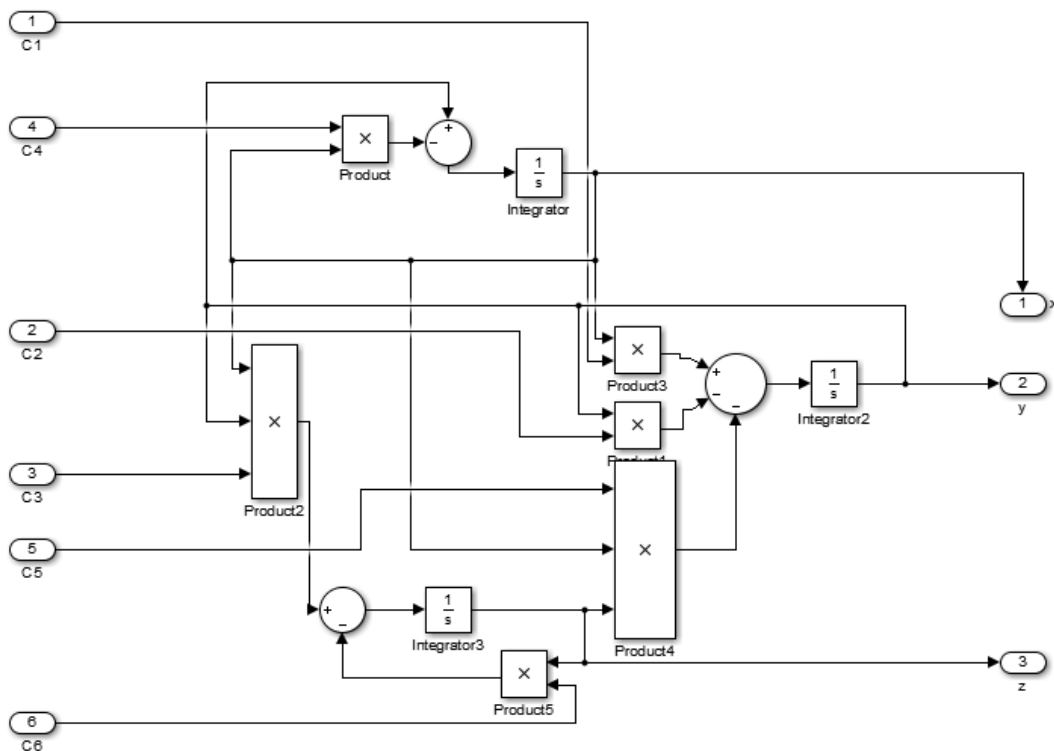


Рисунок 2.9 – Наборная модель технологической системы Лоренца в Simulink MATLAB

Для проверки адекватности модели была проведена серия экспериментов [25]. Эксперимент проводился в условиях: механическая подсистема – токарно-винторезный станок 16К20Ф3С5; обрабатываемый материал – сталь 40Х; режущий инструмент – минералокерамический инструмент ВОК60, твердый сплав Т15К6; условие сухого трения (отсутствие смазывающе-охлаждающих жидкостей); скорость обработки – $V = 630-2000$ об /мин; подача $s = 20-150$ мм/мин; глубина резания $t = 0,25$ мм. Во время обработки фиксировался виброакустический сигнал с помощью пьезоакселерометра с частотным диапазоном $0 - 21$ кГц установленном на резце для получения временной реализации процесса в проекции на оси координат Ox , Oy , Oz .

Для оценки параметров исследуемой системы Лоренца использовался уточненный метод Эйлера.

Модель системы имеет вид:

$$\begin{cases} x' = -C_4 x + y \\ y' = C_1 x - C_2 y - C_3 xz, \\ z' = C_5 xy - C_6 z \end{cases} \quad (2.12)$$

где параметры $C_1 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{h}{m} - \frac{c}{m} - \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2$, $C_2 = \left(\frac{h}{m} - \frac{k_1}{k_2}\right)$, $C_3 = \frac{1}{m}$, $C_4 = \frac{k_1}{k_2}$, $C_5 = \frac{k_2}{T}$, $C_6 = \frac{1}{T}$, среди которых оценка проводилась для C_1, C_2, C_4, C_5 .

Для оценки устойчивости трибосистемы принципиальное значение имеют два параметра C_1 и C_2 , так как они определяют знак в системе. При условии $C_2 > 0$ диссипативное влияние процесса трения достаточно велико и степень влияния мощности на изменение свойств трибосреды больше, чем работы сил в трибоконтакте. Коэффициент C_1 , характеризующий частоту колебаний в системе, можно представить как функцию от c . Поэтому параметр C_1 (а точнее c) в системе будет управляющим. По мере движения точки равновесия системы изменяются значения динамической жесткости и диссипации.

Будем считать все параметры системы k_1, k_2, h, m, T неизменными, кроме суммарной жесткости $c = c_0 - \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ системы. Расчет проводился, учитывая, что известны: масса подсистемы резца $m = 50$ кг; время эксперимента T : за 1с зафиксировано 44100 точек, значит 10000 точек за время $T=0,226757$ с; коэффициент сопротивления при резании металлов на воздухе $h_0 = 0,8$ Нс/м. Коэффициент жесткости $c_0 = 2000$ кг/мм. $C_6 = 1/T = 4,41$, $C_3 = 1/m = 0.02$. Из первого и третьего уравнения системы (2.12) выразим параметры:

$$C_4 = \frac{y - x'}{x} \text{ и } C_5 = \frac{z' + C_6 z}{xy}.$$

Так как $C_2 = \left(\frac{h_0}{m} - \frac{k_1}{k_2}\right) = C_3 h_0 - C_4$, тогда из второго уравнения следует

$$C_1 = \frac{y' + C_2 y + C_3 xy}{x}.$$

Учитывая выражение: $C_1 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{h}{m} - \frac{c}{m} - \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2$ найдем коэффициент

суммарной динамической жесткости: $c = \frac{-C_1}{m} + \frac{C_4 h_0}{m} - C_4^2$.

Используя уточненный метод Эйлера, получим формулы оценки параметров:

$$\begin{aligned}
C_4 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{y_i - \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2H}}{x_i}, \\
C_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2H} + C_6 z_i}{x_i y_i}, \\
C_2 &= C_3 h_0 - C_4, \\
C_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2H} + C_2 y_i + C_3 x_i y_i}{x_i},
\end{aligned} \tag{2.13}$$

где x_i, y_i, z_i – значения временных рядов на i – ом шаге соответственно, $N=10^4$ – длина временного ряда, $H = 0,01$ - шаг интегрирования. Численный счет проводился с помощью программного пакета «MathCAD 15». Относительная погрешность оценки параметров не должна превышать 5%.

Наличие устойчивости или неустойчивости в системе определялось с помощью показателя Херста, который характеризует временные ряды. Имеются три различных классификации для показателя Херста [30]:

1) $H = 0,5$. Указывает на случайный ряд. Система неустойчива, возможна ее деградация.

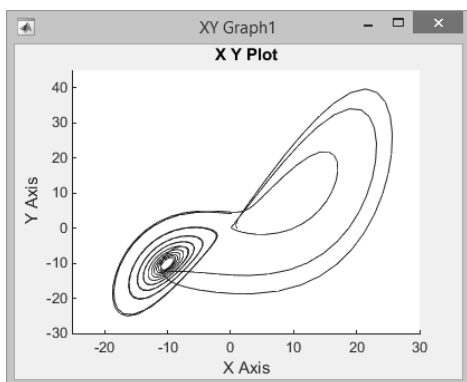
2) $0 \leq H < 0,5$. Такой тип системы часто называют – «возврат к среднему». Если система демонстрирует рост в предыдущий период, то, скорее всего, в следующем периоде начнется спад и наоборот. Устойчивость такого поведения зависит от того, насколько H близко к нулю. Такой ряд более изменчив, чем ряд случайный, а значение показателя говорит о наличии поблизости точки бифуркации.

3) $0,5 < H < 1$. Имеем устойчивый ряд и устойчивую систему.

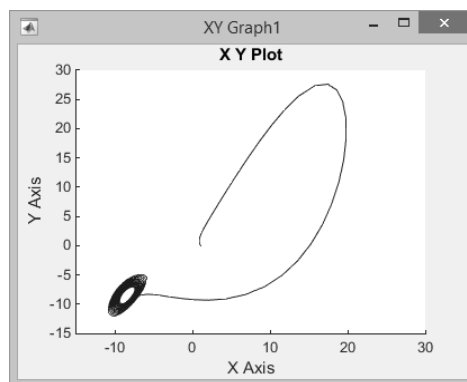
Коэффициент суммарной динамической жесткости [25]:

$$c = \frac{-C_1}{m} + \frac{C_4 h_0}{m} - C_4^2.$$

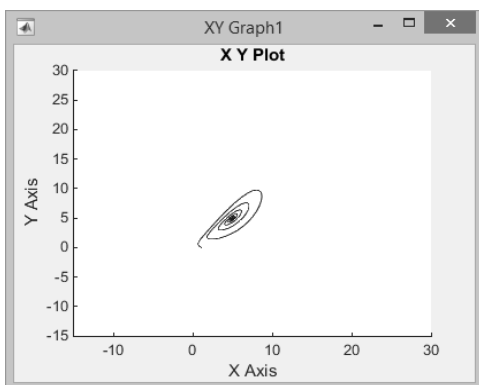
Для различных значений c были построены фазовые портреты, по которым определялась устойчивость системы (рисунок 2.10).



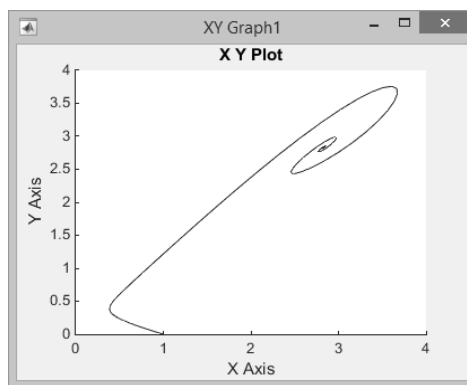
a



б



в



г

a – классическая система Лоренца; *б* – $c = -25$; *в* – $c = -5$; *г* – $c = 10$

Рисунок 2.10 – Фазовые портреты технологической системы

В результате экспериментов было выявлено [24; 25]:

- при $c > 0$ система имеет единственную асимптотически устойчивую точку, т. е. при подаче, равной 10 мм, система является относительно устойчивой;

- при $c = 0$; $-11 < c < -17$; $-24 < c < -27$ система находится в состоянии бифуркации и способна самопроизвольно перейти в новое состояние;

- при остальных отрицательных значениях c система относительно устойчива;

- при обработке минералокерамическим инструментом ВОК60 наиболее эффективными для работы станка являются значения подачи: 60-90 мм/мин; при обработке твердым сплавом Т15К6 – 10, 30, 60-80, 130 мм/мин.

С точки зрения управляемости процесса особенный интерес для трибосистемы представляет случай, когда параметры системы определяют её положение вблизи бифуркационных преобразований, при этом достаточно малого изменения управляющих параметров для того, чтобы система са-

мопроизвольно перешла в состояние детерминированного поведения, т.е. наблюдается ее спонтанная самоорганизация [23; 25].

Вопросы для самоконтроля

- 1 Какие основные задачи решаются в ходе исследований процесса резания?
- 2 Что собой представляет модель Лоренца для технологической системы?
- 3 В чем заключается переход от классической модели Лоренца к модели технологической системы?
- 4 Укажите параметры настройки моделирования в MATLAB?
- 5 Как влияют методы решения дифференциальных уравнений на результат моделирования в программе MATLAB?
- 6 При каких условиях достигаются наилучшие показатели качества технологической системы?

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

3.1 Создание модели на основе искусственной нейронной сети

Искусственная нейронная сеть (ИНС), работающая по принципу биологических нейронов, может быть использована для решения задач в условиях неопределенности, в том числе при проектировании технологических операций [31]. Искусственная нейронная сеть позволяет увидеть зависимости входных и выходных параметров, факторов, их влияние на результат моделирования и не нуждается в математическом описании каких-либо закономерностей моделируемого процесса [32; 33].

Структура нейронной сети состоит из множества нейронов, соединенных между собой синапсами (весовыми коэффициентами), и представлена на рисунке 3.1. Слева белым цветом изображены входные нейроны, в центре три серых нейрона составляют скрытый слой, черный – выходной нейрон. Нейрон является единицей обработки информации в ИНС.

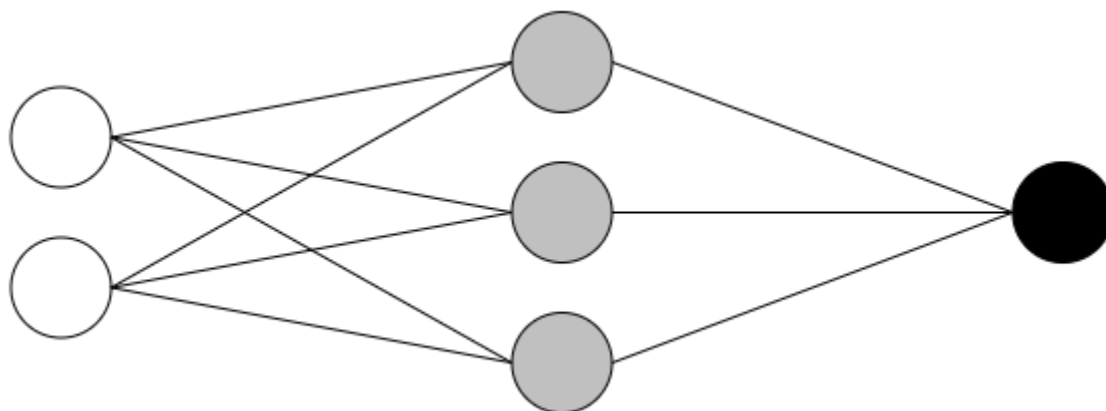


Рисунок 3.1 – Структура ИНС

ИНС подходит для решения широкого круга проблем, связанных с моделированием процессов любой физической природы и задачами прогнозирования и классификации. В данном учебном пособии рассматривается применение ИНС в качестве математической модели при проектировании операций шлифования.

Вследствие простоты математической модели нейрона и реализации ИНС, сложность работы с ИНС связана с процессом построения и обучения сети.

Построение нейронной сети состоит из следующих этапов:

- выбор возможного типа обучения;
- выбор топологии (вида) нейронной сети;
- обучение.

Выбор типа обучения с учителем или без учителя определяется имеющимися входными данными и задачей. Обучение с учителем основано на наличии входных данных и желаемых выходных данных, которые можно рассматривать как участие учителя со знаниями об окружающей среде, представленными в виде пар вход – выход. Исследуемая среда в этом случае неизвестна обучаемой нейронной сети. Веса синапсов, являющиеся параметрами сети, корректируются в зависимости от величины сигнала ошибки, который представляет собой разность между желаемым результатом и реальным выходом ИНС. Реализация обучения с учителем – это обучение ИНС, основанное на коррекции ошибок.

При малом количестве обучающих примеров используют метод многократной перекрестной проверки, идея которого заключается в разбиении обучающего множества, состоящего из N примеров на K подмножеств. Обучение модели проводится на всех полученных множествах кроме одного, на нем проверяется качество модели [32]. Графически данный подход изображен на рисунке 3.2. Тестовое множество (Test) не меняется, в то время как обучающее множество делится на равные обучающие подмножества (Train), каждое из которых на очередной итерации используется как проверочное подмножество (Validate). Если данных для обучения слишком мало, то можно использовать данный метод в экстремальной форме – проводить проверку лишь на одном примере.

Для решения задачи моделирования процесса в качестве способа обучения рационально выбирать «обучение с учителем», основанное на использовании для обучения сети данных, полученных в ходе физических экспериментов. Качество обучения и возможность обобщения ИНС во многом определяется подобранным массивом обучающих данных [34, 35].

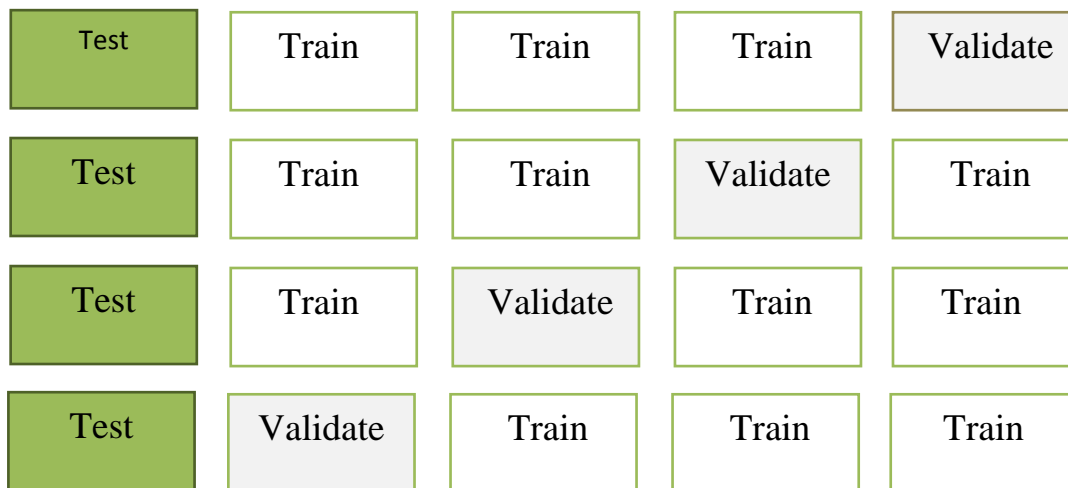


Рисунок 3.2 – Разбиение исходных данных на подмножества

На способность ИНС к обобщению влияют 2 фактора: обучающее множество и архитектура сети. В связи с этим для обеспечения обобщающей способности ИНС есть 2 подхода [33]:

1 Архитектура сети – фиксированная, поэтому необходимо подобрать нужное число обучающих примеров;

2 Обучающее множество – фиксированное, поэтому необходимо подобрать оптимальную структуру ИНС.

Размер выборки для обобщения вычисляется по формуле, полученной из эмпирического правила Видроу:

$$N = O \frac{W}{\varepsilon},$$

где N – количество элементов в обучающей выборке; W – количество свободных параметров сети (синаптические веса); ε – допустимая точность ошибки; O – порядок заключенной в скобки величины.

Для проектируемой ИНС с одним скрытым слоем из 8 нейронов, входного и выходного слоя с 12 и 4 нейронами соответственно, количество свободных параметров (весов) составляет 128. Для допустимой ошибки в 5% размер обучающего множества N в соответствии с формулой составляет 2560.

3.2 Применение нейросетевых моделей для разработки технологических операций

Входные и выходные данные для обучения нейронной сети моделирования операций шлифования представлены соответственно в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Входные обучающие данные ИНС

Параметр / №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр зерна, мм	1.04	0.885	0.745	0.625	0.525	0.438	0.37	0.31	0.26	0.218
Структура круга (% объема зерна)	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Твердость круга	N (CA)	N (CA)	N (CA)	N (CA)	N (CA)	N (CA)	N (CA)	N (CA)	N (CA)	N (CA)
Диаметр круга, мм	200	200	250	250	300	300	275	275	350	350
Высота круга, мм	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50
Предельное напряжение связки при растяжении, МПа	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Предельное напряжение связки при сжатии, МПа	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490
Предел прочности материала заготовки, МПа	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
Скорость резания, м/с	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43
Продольная подача, мм/мин	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000

Поперечная подача, мм/ход	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Глубина шлифования, мкм	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Таблица 3.2 – Выходные обучающие данные ИНС

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Средняя глубина шлифования с учетом площади контакта, мкм	3.130	3.769	4.365	5.004	5.595	6.234	6.819	7.459	8.039	8.681
Прочность удержания зерна, Н	217.21	157.29	111.46	78.448	55.353	38.527	27.493	19.299	13.576	13.576
Средняя сила резания, Н	92.22	79.61	58.73	46.72	33.57	25.63	20.59	15.56	10.42	11.07
Мощность шлифования, Вт	2838.5	2653.9	2111.3	1797.5	1379.5	128.2	953.41	759.42	535.20	596.10

Определение структуры было определено эмпирическим путем. Вследствие малого объема обучающей выборки необходимо, чтобы количество свободных параметров сети (синаптических весов) было минимально. В таблице 3.3 представлен минимальный уровень ошибки и количество нейронов скрытого слоя после проведения эксперимента по подбору параметров сети (эксперимент проводился на 10 000 эпохах обучения) [31].

Таблица 3.3 – Зависимость уровня ошибки от количества скрытых нейронов

Количество нейронов в скрытом слое	Минимальная ошибка, полученная за 10 000 эпох обучения	Ошибка, полученная на последней эпохе обучения
1	0.112121	0.214782
2	0.077820	0.124265
3	0.045573	0.079050
4	0.021631	0.029893
5	0.02853	0.047863
6	0.005644	0.021237
7	0.004999	0.026728
8	0.005121	0.014909
9	0.003778	0.017663
10	0.005271	0.020895
15	0.004652	0.077304

Графически зависимость минимального уровня ошибки обучения от количества скрытых нейронов представлена на рисунке 3.3.

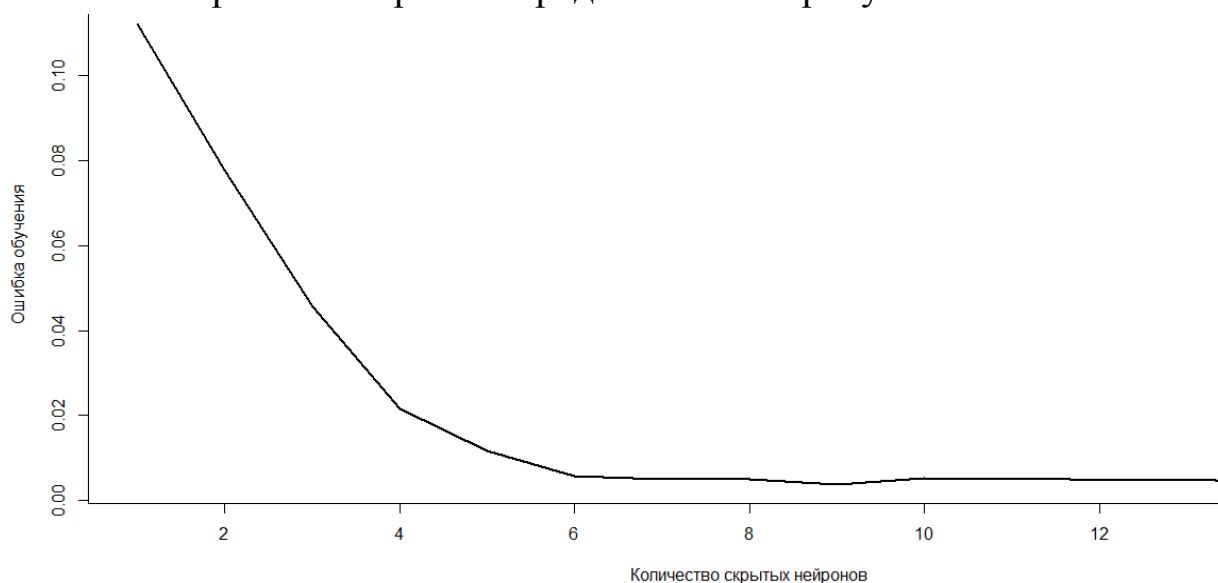


Рисунок 3.3 – Зависимость ошибки обучения от количества скрытых нейронов

Анализ графика показывает, что значение ошибки при наличии в сети более 6 скрытых нейронов меняется незначительно. Таким образом, для сохранения обобщающей возможности ИНС оптимальное количество нейронов в скрытом слое 6.

Обучение ИНС, проведенное по типу «обучение с учителем», происходило в несколько итераций по 200 000 эпох обучения до уменьшения ошибки обучения до значения 0.00005. В таблице 3.4 представлены полученные данные обучения.

Таблица 3.4 – Итоги обучения ИНС

Номер итерации	Количество эпох обучения	Суммарная ошибка по всей обучающей выборке	Относительная ошибка по всей обучающей выборке, %
1	200 000	1.486	3.692
2	39 576	0.114	0.397
3	200 000	1.128	3.957
4	200 000	0.366	1.255
5	200 000	0.487	2.018
6	200 000	0.695	3.017

Увеличение числа итераций не требовалось, т.к. в дальнейшем ошибка обучения уменьшалась незначительно. На рисунке 3.4 представлен график величины ошибки обучения ИНС в зависимости от числа эпох обучения.

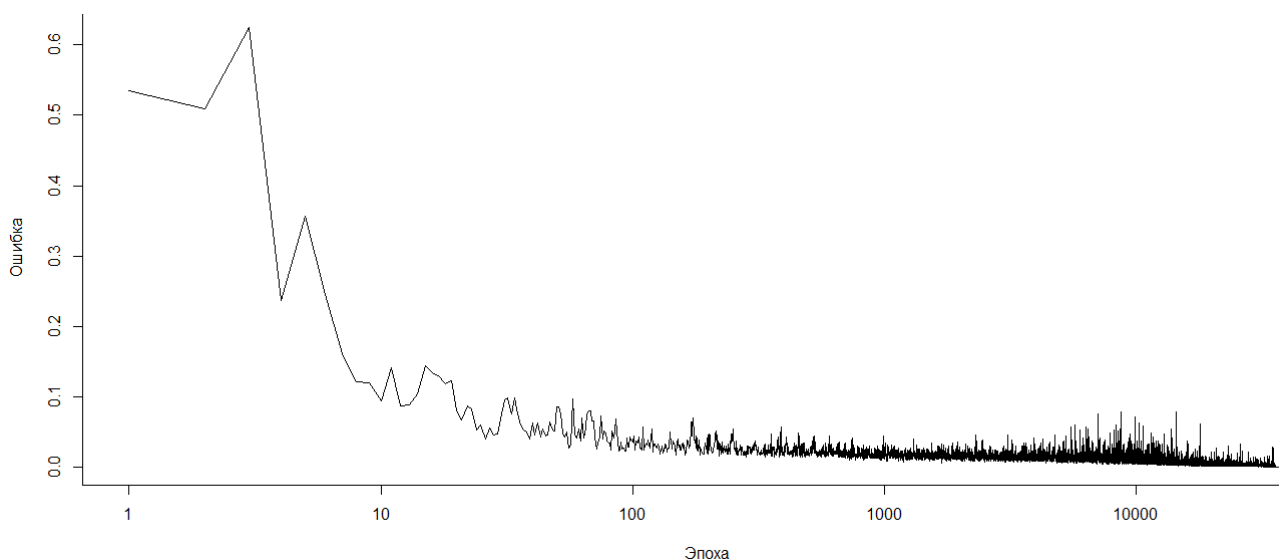


Рисунок 3.4 – Зависимость ошибки обучения ИНС от числа эпох обучения

В таблице 3.5 представлены результаты работы нейронной сети на обучающих данных и уровень расхождения с эталонным значением.

Таблица 3.5 – Результаты работ ИНС

№		У1	У2	У3	У4
1	Тестовое	3.131	217.214	92.22	2838.532
	Фактическое	3.128	216.95	92.42	2841.095
2	Тестовое	3.769	157.292	79.61	2653.993
	Фактическое	3.772	157.744	78.992	2650.15
3	Тестовое	4.366	111.464	58.73	2111.303
	Фактическое	4.371	111.674	58.914	2103.821
4	Тестовое	5.004	78.448	46.72	1797.531
	Фактическое	4.999	77.713	47.337	1817.499
5	Тестовое	5.595	55.353	33.57	1379.59
	Фактическое	5.592	55.432	33.704	1379.796
6	Тестовое	6.234	38.527	25.63	128.241
	Фактическое	6.237	38.729	25.094	1103.215
7	Тестовое	6.819	27.493	20.59	953.415
	Фактическое	6.812	27.071	20.067	926.732
8	Тестовое	7.46	19.299	15.56	759.425
	Фактическое	7.465	19.743	16.09	780.557
9	Тестовое	8.04	13.576	10.42	535.202
	Фактическое	8.046	13.885	10.417	568.778
10	Тестовое	8.681	13.576	11.07	596.103
	Фактическое	8.675	13.176	11.058	570.596

Расчеты по данным таблицы 3.5 показали, что погрешность работы сети лежит в диапазоне от 0,1% до 2%, что гарантирует корректную работу математической модели проектирования процесса шлифования на базе ИНС.

Разработанная модель использована при создании специализированной системы автоматизированного проектирования операций шлифования, состоящей из нескольких модулей [31].

Модуль «Моделирование» является основным при проектировании операций на основе имеющейся модели. В качестве входных и выходных данных используются входные факторы и выходные параметры модели соответственно.

Разработка моделей на основе нейронных сетей осуществляется в модуле «Создание моделей» и включает в себя: создание и оптимизацию структуры; обучение ИНС; подбор параметров нейронной сети. Входными

данными являются обучающие примеры и параметры обучения модели. Результатом является модель ИНС, которая хранится в модуле «Архив моделей».

Создание модели операций в разработанной САПР осуществляется следующим образом:

- 1 Загрузка в систему обучающих массивов данных;
- 2 Расчет параметров будущей модели; анализ исходных данных и вывод информации о качестве обучающих массивов;
- 3 Создание структуры нейронной сети;
- 4 Обучение нейронной сети, настройка весовых коэффициентов сети;
- 5 Вывод информации об окончании обучения и результатов обучения.
- 6 Сохранение полученной модели.

Перед началом моделирования важно определить состав входных и выходных параметров, а также подготовить обучающее множество эмпирических примеров не менее 100–200 для построения качественной модели с высоким уровнем обобщения.

На рисунке 3.5 представлен внешний вид интерфейса страницы создания модели.

Создание модели

Входные и выходные данные должны храниться в формате CSV (разделитель ';'), где столбцами являются значения переменных, а первый слобец содержит названия переменных.

Название модели

Модель процесса плоского шлифования

Входные данные

Выберите файл input.csv

Выходные данные

Выберите файл output.csv

Структура нейронной сети

12 8 4

Рисунок 3.5 – Страница создания модели

На основании полученных данных, пользователю предлагается указать топологию сети. Выбрать нужные параметры (функция активации, функция ошибки и др.). Пользователь, не знакомый с нейронными сетями, может довериться системе, в которой рекомендуемые значения устанавливаются по умолчанию. И напротив, «продвинутый» пользователь сможет указать такие параметры сети, какие считает нужными.

На рисунке 3.6 представлен внешний вид страницы с рекомендациями и настройкой параметров.

Создание модели по окончании построения архитектуры сети завершает процесс обучения, который совершается автоматически и не требует участия пользователя. После обучения модель готова к использованию.

В модуле «Анализатор» производится анализ созданной модели, для чего модуль рассчитывает таблицы зависимостей входных факторов и выходных переменных на основе корреляционного анализа и анализа синаптических весов и определяет параметры, оказывающие наибольшее влияние на работу модели. На основе анализа проводится коррекция входных факторов. Входные факторы, оказывающие минимальное влияние на работу модели, исключаются для упрощения структуры и улучшения качества модели.

The screenshot shows a web interface with a light gray background. It is divided into two main sections: 'Параметры обучения' (Training Parameters) and 'Результаты обучения' (Training Results). Under 'Параметры обучения', there are two input fields: 'Количество циклов обучения' (Number of training cycles) with the value '100 000' and 'Желаемый уровень ошибки' (Desired error level) with the value '0.00005'. Under 'Результаты обучения', there are two input fields: 'Среднее отклонение' (Average deviation) with the value '4.2345%' and 'Количество эпох обучения' (Number of training epochs) with the value '100 000'.

Рисунок 3.6 – Этап рекомендаций и настройки сети на странице создания модели

Цикл «создание модели» - «анализ модели» повторяется до определения оптимальных параметров нейронной сети. После создания и анализа модели следует перейти к ее использованию на странице проектирования.

На рисунке 3.7 представлен внешний вид страницы раздела проектирования. На данной странице пользователю предлагается выбрать модель, по которой будет происходить проектирование, задать входные параметры и получить результаты моделирования проектируемого технологического процесса.

Модуль «Справочник» содержит в себе полезную для пользователя информацию, которая поможет и облегчит ему работу с системой и процессом проектирования в целом.

Модуль «Пользовательский интерфейс» необходим для удобства ввода данных пользователем и соответствующей передачи этих данных в «понятном» для системы виде и является оболочкой для всех вышеперечисленных модулей.

Созданная система проектирования базируется на системном подходе и разделена на соответствующие модули, каждый со своей зоной ответственности, что позволяет дополнять и разрабатывать модули системы. Разработанная модель на основе ИНС является математическим ядром разработанной системы автоматизированного проектирования операций плоского шлифования.

Проектирование операции

Выберите модель:
Модель процесса плоского шлифования

Входные факторы	Выходные параметры
Диаметр зерна, мм 1.04	Средняя глубина шлифования с учетом площади контакта 3.128
Структура (% объема зерна) 44	Прочность удержания зерна 216.95
Твердость (бакелит) 33	Средняя сила резания 92.42
Диаметр круга, мм 200	Мощность шлифования 2841.095
Высота круга, мм 30	
Предельное напряжение связки при растяжении, Мпа 70	
Предельное напряжение связки при сжатии, Мпа 490	
Предел прочности материала заготовки, Мпа 510	
Скорость резания, м/сек 25	
Продольная подача, мм/мин 5000	
Поперечная подача, мм/ход 20	
Глубина шлифования, мм 5	

Вычислить Оптимизировать

Активация
Чтобы активировать
раздел "Параметры"

Рисунок 3.7 – Страница проектирования

Вследствие способности нейронной сети адаптировать свои синоптические веса к изменениям окружающей среды, нейронные сети, обученные действовать в определенной среде модели, могут быть легко переучены для работы в условиях незначительных изменений условий функционирования. Например, ИНС, обученная для моделирования шлифования с диаметром круга от 30 до 100 мм, может моделировать процесс при изменении диаметра 150 мм, хотя во время обучения сети не было таких обучающих данных; ИНС, обученная на круглом шлифовании с продольной подачей, может моделировать процессы круглого шлифования с поперечной подачей.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Для решения каких задач применяются нейронные сети?
- 2 Какова структура искусственной нейронной сети?
- 3 Опишите процесс обучения искусственной нейронной сети.
- 4 Какой размер выборки необходим для обучения ИНС?
- 5 Какие модули входят в состав специализированной САПР?
- 6 Опишите последовательность проектирования операций шлифования с использованием САПР на основе ИНС?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии представлены математические модели, расчетные методики и средства автоматизации проектирования режимно-инструментального оснащения технологических операций в машиностроении. Приведены примеры разработки моделей шлифования и абразивного инструмента, современные методики нейро-сетевого моделирования процесса обработки, применение математических моделей для исследования устойчивости процессов и примеры создания математических моделей в программном пакете MATLAB, описаны научные достижения и тенденции развития математического и компьютерного моделирования механической обработки, основные положения общей теории устойчивости систем, использованные при исследованиях.

Примеры компьютерных моделей инструмента и процесса обработки, приведенные в пособии, дают возможность получения базовых математических зависимостей для расчета оптимальных режимов выполняемых операций и статических характеристик применяемого инструмента. Рассмотрены актуальные аспекты взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым материалом, динамика изменения показателей процесса обработки, связанная с износом инструмента, свойствами структуры и инструментального материала, которые положены в информационно-алгоритмическую основу созданных компьютерных моделей, обеспечивающих возможность ведения автоматизированных расчетов и принятия оптимальных проектных решений с использованием ЭВМ.

Подробно описана открытая технологическая специализированная САПР, позволяющая осуществлять информационную поддержку и проектирование операций шлифования с расчетом оптимальных характеристик инструмента и режимов обработки. САПР с возможностями автоматизации выбора абразивного инструмента и параметров процесса, созданная на основе математической модели с использованием ИНС, способствует повышению качества и сокращению времени проектирования.

Современные достижения в области компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования режимно-инструментального оснащения современных производств с использованием технологических САПР и иных программных продуктов позволяют не только существенно снизить время проектирования, но и значительно повысить качество разработанных технологических документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Переладов, А. Б. Автоматизация режимно-инструментального оснащения операций шлифования с использованием компьютерных моделей инструмента и процесса обработки : учеб. пособие / А. Б. Переладов, И. П. Камкин. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. – 94 с.
- 2 Байкалов, А. К. Введение в теорию шлифования материалов : монография / А. К. Байкалова. – Киев : Наукова думка, 1978. – 207 с.
- 3 Шаталова, И. Г. Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов / И. Г. Шаталова, Н. С. Горбунов, В. И. Лихтман ; Акад. наук СССР. Ин-т физ. химии. – Москва : Наука, 1965. – 163 с.
- 4 Переладов, А. Б. Прогнозирование показателей дисперсной системы шлифовального круга с использованием компьютерной модели / А. Б. Переладов, И. В. Кожевников, А. Н. Некинелов, А. В. Биринцев // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. – Курган, 2007. – №9. – С.80-83.
- 5 Переладов, А. Б. Изучение дисперсной системы структуры абразивного инструмента со сложным зерновым составом / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, А. В. Анохин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – №10 (655). – С. 48-52.
- 6 Malkin S. Grinding technology: Theory and Application of Machining with Abrasives / Stephen Malkin, Changsheng Guo. – New York : Industrial Press Inc, 2008. – 372 p.
- 7 Переладов, А. Б. Исследование статистико-вероятностных характеристик рабочей поверхности шлифовального круга / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, А. В. Анохин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – №3. – С. 67-71.
- 8 Переладов, А. Б. Моделирование процесса шлифования с использованием программного комплекса T-flex / А. Б. Переладов, И. П. Камкин // Зауральский научный вестник. – 2013. – № 1 (3). – С. 30-33.
- 9 Переладов, А. Б. Повышение эффективности операций шлифования путем направленного регулирования параметров рабочего слоя абразивного инструмента : дис. ... канд. техн. наук / А. Б. Переладов. – Курган, 1998. – 150 с.
- 10 Переладов, А. Б. Определение интегральных показателей кинематического взаимодействия шлифовального круга с заготовкой / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, А. В. Анохин, И. В. Кожевников // Металлообработка. – 2013. – № 5/6. – С. 28-34.
- 11 Переладов, А. Б. Изучение геометрических параметров поверхности контакта с заготовкой для схем плоского и круглого шлифования с использова-

- нием пакетов твердотельного моделирования / А. Б. Переладов, И. В. Кожевников // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. – Курган, 2005. – Вып. 2. – С.79-81.
- 12 Переладов, А. Б. Экспериментальное изучение износа рабочей поверхности шлифовального круга / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, А. В. Анохин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 70-74.
- 13 Переладов, А. Б. Автоматизация проектирования операций шлифования и подготовки производства абразивного инструмента / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, И. В. Кожевников // Технология машиностроения. – 2014. – № 7 (145). – С. 51-55.
- 14 Переладов, А. Б. Компьютерные технологии в области производства и потребления абразивного инструмента / А. Б. Переладов, И. П. Камкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т.12. – Вып. 21 (148). – С. 35-40.
- 15 Кащук, В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Кащук, А. Б. Верещагин. – Москва : Машиностроение, 1988. – 480 с.
- 16 Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, С. П. Протопопов и др. – Москва : Машиностроение, 1980. – 536 с.
- 17 Кузнецов, С. П. Динамический хаос / С. П. Кузнецов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 296 с.
- 18 Аршанский, М. М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – Москва : Машиностроение, 1988. – 136 с.
- 19 Остапчук, А. К. Синергетический подход к определению отклика технологической системы на внешнее воздействие / А. К. Остапчук, В. Е. Овсянников // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2011. – №3. – С.36-41.
- 20 Остапчук, А. К. Применение функции спектра мощности для определения фрактальной размерности временного ряда / А. К. Остапчук, В. Е. Овсянников, Е. Ю. Рогов // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. – Курган, 2010. – №17. – С.124-125.
- 21 Симонов, А. М. Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга : монография / А. М. Симонов, А. К. Остапчук, В. Е. Овсянников ; под ред. Н. Л. Поповой. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 116 с.
- 22 Lorenz E. N. Deterministic Nonperiodic Flow / E. N. Lorenz // In Journal of the Atmospheric Sciences. – 1963. – Vol. 20 (2) – P. 130-141.
- 23 Остапчук, А. К. Применение теории детерминированного хаоса к исследованию технологических систем / А. К. Остапчук // Вестник Курганского госу-

- дарственного университета. Сер. Технические науки. – Курган, 2007. – №3. – С.132-134.
- 24 Кузнецова, Е. М. Моделирование процесса резания с использованием системы Уравнений Лоренца / Е. М. Кузнецова // Вектор современной науки. – 2017. – №1.
- 25 Остапчук, А. К. Моделирование процесса обработки деталей транспортных машин с использованием системы Уравнений Лоренца / А. К. Остапчук // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – Т. 1. – Пермь : ПНИПУ, 2013. – С. 254-266.
- 26 Малинецкий, Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент : введение в нелинейную динамику / Г. Г. Малинецкий. – Москва : Эдиториал УРСС, 2000. – 256 с.
- 27 Дьяконов, В. П. MATLAB 7.*/R2006/R2007 : самоучитель / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 768 с.
- 28 Мещеряков, В. В. Задачи по математике с Matlab & Simulink / В. В. Мещеряков. – Москва : Диалог-МИФИ, 2007. – 528 с.
- 29 Мартынов Н. Н. MATLAB 5.X. Вычисления, визуализация, программирование / Н. Н. Мартынов, А. П. Иванов. – Москва : КУДИЦ-Образ, 2000. – 336 с.
- 30 Кликушин, Ю. Н. Метод фрактальной классификации сложных сигналов / Ю. Н. Кликушин // Журнал Радиоэлектроники. – 2000. – № 4.
- 31 Переладов, А. Б. Проектирование операций шлифования на основе моделирования с применением искусственной нейронной сети / А. Б. Переладов, О. В. Дмитриева // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2017. – №3. – С. 99-102.
- 32 Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд., испр. – Москва : Вильямс, 2008. – 1104 с.
- 33 Widrow B. and S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1985.
- 34 Носенко, В. А. Исследование распределения геометрических параметров фракций шлифовального порошка 54CF60 и их принадлежности к нормальному закону / В. А. Носенко, А. А. Александров // Наука и образование в современной конкурентной среде : материалы Межд. науч.-практ. конференции (Уфа, 15-16 февр., 2014 г.) : в 3-х ч. – Уфа : РИО ИЦИПТ, 2014.– Ч. II. – С. 123-129.
- 35 Носенко, В. А. Определение закона распределения вершин зерен абразивного круга методом профилографирования шлифованной поверхности / В. А. Носенко, Е. В. Федотов // Векторы развития современной науки : материалы Межд. науч.-практ. конференции (Уфа, 20-21 янв., 2014 г.). – Уфа : Исследовательский центр информационно-правовых технологий, 2014. – С. 133-137.

Учебное издание

Дмитриева Ольга Венедиктовна
Переладов Александр Борисович
Кузнецова Елена Михайловна
Камкин Иван Павлович

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЙ И ИНСТРУМЕНТА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Учебное пособие

Авторская редакция

Подписано к печати	18.12.17	Формат 60x84 1/16	Бумага 80 г/м ²
Печать цифровая		Усл.печ.л. 4,38	Уч.изд.л. 4,38
Заказ № 238		Тираж 100	

Библиотечно-издательский центр КГУ.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.