



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

ПРАКТИКУМ по дисциплине

«Основы механики технологических процессов и оборудования»

Авторы
Быкадор В.С.,
Носачев С.В.

Ростов-на-Дону, 2014



Аннотация

Приведены задания к практическим работам по дисциплине «Основы механики технологических процессов и оборудования». Предназначено для студентов очного отделения, обучающихся по направлению бакалавриата 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Авторы

канд. техн. наук Быкадор В.С,
старший преподаватель Носачев С.В.





Оглавление

1 Анализ формообразующих движений и разработка кинематических связей металлорежущих станков.....	5
1.1 Задание к выполнению практической работы	5
1.2 Порядок выполнения практической работы	9
2 Моделирование экспериментальных характеристик процесса резания	10
2.1 Вводные замечания	10
2.2 Задание к выполнению практической работы	10
2.3 Порядок выполнения практической работы	12
3 Ориентировочная оценка режимов и сил резания по нормативным таблицам.....	14
3.1 Задание к выполнению практической работы	14
3.2 Порядок выполнения практической работы	19
4 Составление концептуальных и математических моделей динамики технологических систем	22
4.1 Вводные замечания	22
4.2 Задание к выполнению практической работы	24
4.3 Порядок выполнения практической работы	24
5 Цифровое моделирование динамики технологической системы	26
5.1 Задание к выполнению практической работы	26
5.2 Порядок выполнения практической работы	27
6 Связь корней с видом решения ОЛДУ 2-го порядка во времени и на фазовой плоскости	29
Задание к выполнению практической работы.....	29
Порядок выполнения практической работы.....	29
7 Исследование качественной структуры окрестности простого состояния равновесия в нелинейной системе ...	31
7.1 Задание к выполнению практической работы	31
7.2 Порядок выполнения практической работы	33
8 Исследование динамики системы при изменении	



Автоматизация производственных процессов

значений управляющего параметра	36
8.1 Задание к выполнению практической работы	36
8.2 Порядок выполнения практической работы	38
Требования к отчету по практической работе	39
Список использованных источников	40



1 АНАЛИЗ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДВИЖЕНИЙ И РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Целью выполнения практической работы является получить основные навыки разработки кинематических схем узлов металлорежущих станков, реализующих требуемые движения исполнительных органов.

1.1 Задание к выполнению практической работы

Необходимо разработать кинематическую схему привода главного движения и приводов подачи гипотетического станка для токарной обработки деталей типа конус (рис. 1.1).

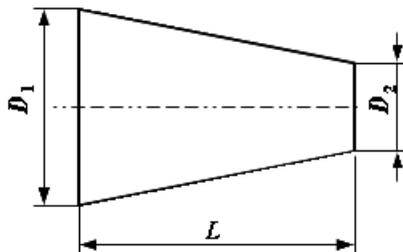


Рис. 1.1 - Деталь

При разработке кинематической схемы станка необходимо соблюдать следующие ограничения:

- 1) возможно использование только одного электродвигателя;
- 2) первая передача, т.е. передача движения от электродвигателя к первому валу должна быть ременной, при этом должны выполняться следующие ограничения, накладываемое на диаметры шкивов:

$$d_i \in [d_{\min}; d_{\max}] \quad (1.1)$$

где d_i – диаметр i -ого шкива; d_{\min} – минимально допустимый диаметр шкива; d_{\max} – максимально допустимый диаметр шкива.

$$\Delta d = |d_1 - d_2| \leq \varepsilon_d \quad (1.2)$$



Автоматизация производственных процессов

где d_1 – диаметр первого шкива в ременной передаче; d_2 – диаметр второго шкива в ременной передаче; ε_d – допустимая разница между диаметрами шкивов в передаче.

- 3) должны соблюдаться следующие требования относительно шестерен и зубчатых колес:

$$z_i \in [z_{\min}; z_{\max}] \quad (1.3)$$

где z_i – количество зубьев в i -ом зубчатом колесе; z_{\min} – минимально допустимое число зубьев, $z_{\min} \in \mathbb{N}$; z_{\max} – максимально допустимое число зубьев, $z_{\max} \in \mathbb{N}$.

$$\Delta z = |z_1 - z_2| \leq \varepsilon_z \quad (1.4)$$

где z_1 – количество зубьев первого колеса в зубчатой передаче; z_2 – количество зубьев второго колеса в зубчатой передаче; ε_z – допустимая разница между количеством зубьев зубчатых колес в передаче.

ЗАМЕЧАНИЕ. СЛЕДУЕТ ОТМЕТИТЬ, ЧТО ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ МАШИН, В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ, УЧИТЫВАЮТСЯ НЕ ТОЛЬКО КИНЕМАТИЧЕСКИЕ, НО И ПРОЧНОСТНЫЕ, СИЛОВЫЕ И ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДОВ. ТАК КАК В ДАННОЙ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ СТАВИТСЯ ЗАДАЧА РАЗРАБОТКИ ТОЛЬКО КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ, ТО ПРОЧНОСТНЫЕ И НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В РАСЧЕТЕ НЕ УЧИТЫВАЮТСЯ. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЯВЛЯЕТСЯ ОСНОВОЙ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА.

В таблице 1.1 приведены численные значения основных параметров приводов станка по вариантам. В таблице 1.2 допустимые значения для ременной и зубчатых передач, а в таблице 1.3. размеры заготовки.



Автоматизация производственных процессов

Таблица 1.1 - Значения основных параметров приводов станка

Вар.	Число оборотов выходного вала электродвигателя $n_{\text{Э}}$, об/мин	Число оборотов вала шпинделя $n_{\text{Ш}}$, об/мин	Шаг ходовых винтов p , мм	Время обработки t_o , мин
1	3000	1500	2	1
2	1500	1000	4	2
3	2500	2000	6	3
4	2000	1000	1,5	1,5
5	1800	1000	3	2
6	3500	2500	5	1
7	2300	1800	7	1
8	2900	1600	2	2
9	1600	1200	6	3
10	2000	1200	2	1
11	3500	1500	3	2
12	1500	900	4	2
13	2300	1000	6,5	4
14	2100	1200	1,5	1,5
15	1000	800	3,2	2
16	3500	2000	1,5	1
17	2300	1000	7,3	1,5
18	2200	1900	3	2,3
19	1100	500	4	3
20	1400	800	2	4
21	2100	1200	4	1
22	1200	600	6	2,5
23	2100	1100	6,5	3
24	2300	1000	2,5	1,5
25	2800	1500	3	2,5

Таблица 1.2 - Допустимые значения параметров для
ременной и зубчатых передач

Вар.	d_{\min} , мм	d_{\max} , мм	ε_d , мм	z_{\min}	z_{\max}	ε_z
1	65	150	85	17	80	40
2	70	200	100	18	85	45
3	75	250	150	19	90	50
4	80	300	200	20	95	55
5	65	150	100	25	100	60
6	70	200	100	30	80	40
7	75	250	120	17	85	45
8	80	300	180	18	90	50
9	65	150	100	19	95	55
10	70	200	100	20	100	60
11	50	100	100	19	80	60
12	65	100	100	17	90	50
13	60	120	100	18	100	50
14	70	170	120	20	85	45
15	75	200	120	22	70	40
16	80	250	150	23	85	50
17	50	200	150	19	80	50
18	65	300	200	18	70	45
19	70	200	120	17	70	40
20	85	150	100	23	80	60
21	50	100	100	21	85	65
22	55	120	100	20	100	70
23	65	110	100	19	80	70
24	80	120	100	18	70	60
25	90	220	150	20	100	85



Таблица 1.3 - Размеры заготовки

Вар.	D_1 , мм	D_2 , мм	L , мм	Вар.	D_1 , мм	D_1 , мм	L , мм
1	100	80	50	14	80	60	20
2	90	70	45	15	70	60	30
3	80	60	40	16	60	40	25
4	70	50	35	17	65	45	20
5	60	40	30	18	80	40	35
6	50	40	25	19	85	30	45
7	40	30	20	20	90	60	40
8	30	20	15	21	50	20	50
9	20	10	10	22	55	20	50
10	10	5	10	23	60	20	60
11	85	50	15	24	65	40	40
12	80	50	18	25	70	50	100
13	100	60	20				

1.2 Порядок выполнения практической работы

1. Определить количество и тип необходимых формообразующих движений.
2. Разработать обобщенную кинематическую схему исполнительных движений станка.
3. Разработать кинематическую схему коробок скоростей и подач гипотетического токарного станка.



2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Цели выполнения практической работы:

- получить основные навыки в использовании полиномов для аналитического описания различных характеристик процесса резания;
- получить навыки практического использования метода наименьших квадратов (МНК) для определения коэффициентов полинома.

2.1 Вводные замечания

Во многих практических случаях для математического описания различных непрерывных, экспериментально полученных характеристик процесса резания, целесообразно использовать полином n -ой степени

$$y(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (2.1)$$

где a_i - i -ый коэффициент полинома, $i = 0..n$.

2.2 Задание к выполнению практической работы

Необходимо найти полином, который будет с достаточной точностью описывать экспериментально полученную характеристику процесса резания.

В таблице 2.1 даны номера рисунков с экспериментально полученными характеристиками процесса резания и масштабные коэффициенты по осям для каждого варианта.

Таблица 2.1 – Исходные данные

Вар.	Коэфф. по оси ординат	Коэфф. по оси абсцисс	Номер рисунка (вид хар-ки)	Вар.	Коэфф. по оси ординат	Коэфф. по оси абсцисс	Номер рисунка (вид хар-ки)
1	1	1	2.1 (P_z)	14	2	1	2.2 ($\gamma = 20^\circ$)

2	1,5	2	2.2 ($\gamma = -10^0$)	15	1	2,6	2.3
3	2	3	2.3	16	2	2	2.4 (L)
4	1	2	2.4 (M'_3)	17	3	1,3	2.1 (P_X)
5	3	2,2	2.1 (P_X)	18	1	1,5	2.2 ($\gamma = -10^0$)
6	2	1,5	2.2 ($\gamma = 0^0$)	19	2,2	3	2.3
7	2,3	1,2	2.3	20	3	2,2	2.4 (M'_3)
8	3	2	2.4 (L)	21	1,3	2,5	2.1 (P_Y)
9	1,2	1	2.1 (P_Y)	22	1,2	2	2.2 ($\gamma = 0^0$)
10	1,5	2	2.2 ($\gamma = 10^0$)	23	1,8	2,8	2.3
11	1	3	2.3	24	2,2	2,2	2.4 (L)
12	2	2,2	2.4 (M'_3)	25	2	2,5	2.1 (P_Z)
13	2	1,5	2.1 (P_Z)				

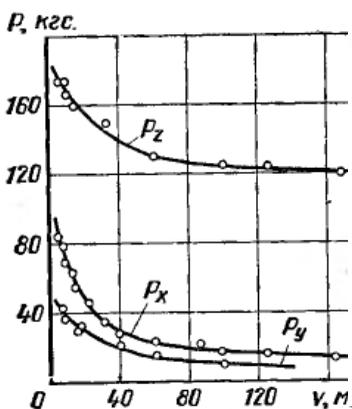


Рис. 2.1 – Влияние скорости резания на составляющие силы резания при точении титанового сплава [1]

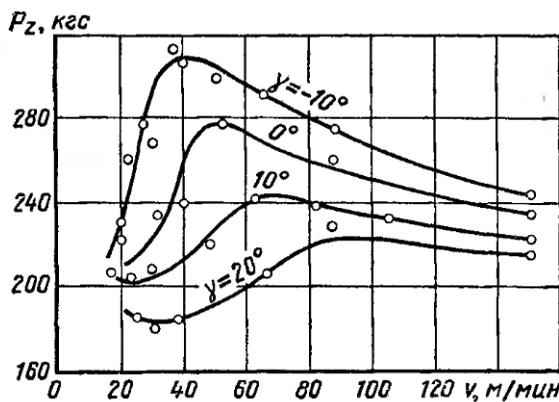


Рис. 2.2 – Влияние скорости резания на тангенциальную составляющую силы резания при различных передних углах резца γ [1]

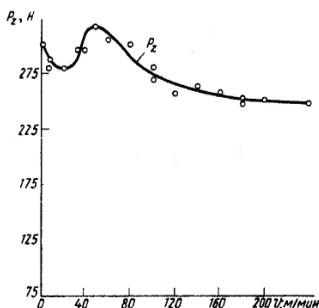


Рис. 2.3 – Зависимость тангенциальной составляющей силы резания от скорости резания при обработке углеродистой конструкционной стали [2]

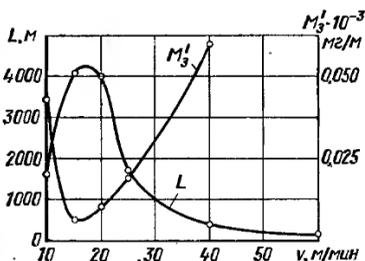


Рис. 2.4 – Влияние скорости резания на интенсивность изнашивания задней поверхности при точении стали [1]

2.3 Порядок выполнения практической работы

1. Задаться полиномом третьего порядка (см. форму-



Автоматизация производственных процессов

лу (2.1)).

2. Определить коэффициенты a_i полинома по экспериментальным данным из условия обеспечения следующего функционала

$$Q(a_i) = \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i - y(x_i))^2 \right\} = \min \quad (2.2)$$

где y_i – i -ое значение экспериментально полученной характеристики; $y(x_i)$ – значение полинома в точке x_i .

Другими словами необходимо найти значения коэффициентов a_i полинома, при которых обеспечивается минимум функционала $Q(a_i)$, что можно сделать из условия

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial Q}{\partial a_n} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

3. Построить функцию найденного полинома третьего порядка.

4. Подобрать полином такой степени, который наилучшим образом аппроксимирует экспериментально полученную характеристику, используя стандартные подпрограммы, реализованные в математических пакетах.

5. Построить функцию найденного в п.4 полинома.



3 ОРИЕНТИРОВОЧНАЯ ОЦЕНКА РЕЖИМОВ И СИЛ РЕЗАНИЯ ПО НОРМАТИВНЫМ ТАБЛИЦАМ

Целью выполнения практической работы является получить основные навыки в использовании нормативных таблиц для ориентировочного расчета режимов и сил резания.

3.1 Задание к выполнению практической работы

В таблицах № 3.1, № 3.2 и № 3.3 приведены исходные данные по вариантам заданий, которые потребуются для выполнения данной практической работы.

Таблица 3.1 – Данные о заготовке и обрабатываемой детали

Вар	Диаметр вала/отверстия	Материал	Тип заготовки	Шероховатость обработыв. поверхности R_a , мкм
1	5	Ст. углерод. $\sigma_B = 100 \text{ МПа}$	без корки	0,63
2	10	Чугун серый $HB = 100$	нормал.	—
3	15	Ст. углерод. $\sigma_B = 150 \text{ МПа}$	прокат	—
4	20	Чугун серый $HB = 150$	нормал.	—
5	25	Ст. углерод. $\sigma_B = 150 \text{ МПа}$	без корки	—



Автоматизация производственных процессов

6	30	Чугун ковкий $HB = 100$	загрязн.	—
7	35	Ст. углерод. $\sigma_B = 100 \text{ МПа}$	прокат	—
8	40	Чугун ковкий $HB = 100$	загрязн.	—
9	45	Ст. углерод. $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$	без корки	1,25
10	50	Чугун серый $HB = 100$	загрязн.	—
11	60	Ст. углерод. $\sigma_B = 200 \text{ МПа}$	прокат	1,25
12	70	Чугун ковкий $HB = 100$	нормал.	—
13	5	Ст. углерод. $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$	без корки	2,50
14	6	Чугун серый $HB = 150$	—	—
15	7	Ст. углерод. $\sigma_B = 100 \text{ МПа}$	—	—



Автоматизация производственных процессов

16	8	Чугун ковкий $HB = 100$	—	—
17	9	Ст. углерод. $\sigma_B = 150 \text{ МПа}$	—	—
18	10	Чугун серый $HB = 100$	—	—
19	11	Ст. углерод. $\sigma_B = 150 \text{ МПа}$	—	—
20	12	Чугун ковкий $HB = 100$	—	—
21	13	Ст. углерод. $\sigma_B = 150 \text{ МПа}$	—	—
22	14	Чугун серый $HB = 150$	—	—
23	15	Ст. углерод. $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$	—	—
24	5	Чугун ковкий $HB = 100$	—	—
25	10	Ст. углерод. $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$	—	—



Таблица 3.2 – Данные о режущем инструменте

Вар.	Инструм. материал	Среднее значение периода стойкости T , мин.	Геометрические параметры			
			радиус при вершине r , мм	гл. угол в плане φ , град.	передний угол γ , град.	угол наклона гл. реж. кромки λ , град.
1	T15K6	30	0,4	30	-15	-5
2	BK6	35	0,8	45	-15	0
3	T15K6	40	1,2	45	0	5
4	BK6	45	1,6	60	0	15
5	T15K6	50	2,0	30	0	15
6	BK8	55	2,4	30	10	0
7	T15K6	60	2,0	45	10	-5
8	BK8	55	1,2	30	-15	5
9	T15K6	50	0,8	30	10	0
10	BK6	45	1,6	60	0	15
11	T15K6	40	2,0	45	0	5
12	BK8	35	2,0	45	10	0
13	T15K6	30	0,4	30	-15	-5
14	BK6	–	–	–	–	–
15	P6M5	–	–	–	–	–
16	BK8	–	–	–	–	–
17	P6M5	–	–	–	–	–
18	BK8	–	–	–	–	–



Автоматизация производственных процессов

19	P6M5	–	–	–	–	–
20	BK8	–	–	–	–	–
21	P6M5	–	–	–	–	–
22	BK8	–	–	–	–	–
23	P6M5	–	–	–	–	–
24	BK8	–	–	–	–	–
25	P6M5	–	–	–	–	–

Таблица 3.3 – Данные о механической обработке

Вар.	Точение/ Сверление	Тип обработ- ки	Глубина резания t , мм/ Глубина обраб. отв., мм
1	Наружное точение	Чистовая	0,1
2	Наружное точение	Черновая	4
3	Наружное точение	Черновая	5
4	Наружное точение	Черновая	6
5	Наружное точение	Черновая	7
6	Наружное точение	Черновая	8
7	Наружное точение	Черновая	9
8	Наружное точение	Черновая	10



Автоматизация производственных процессов

9	Наружное точение	Чистовая	0,2
10	Наружное точение	Черновая	4
11	Наружное точение	Чистовая	0,2
12	Наружное точение	Черновая	6
13	Наружное точение	Чистовая	0,3
14	Сверление	Черновая	20
15	Сверление	Черновая	30
16	Сверление	Черновая	40
17	Сверление	Черновая	45
18	Сверление	Черновая	50
19	Сверление	Черновая	55
20	Сверление	Черновая	60
21	Сверление	Черновая	100
22	Сверление	Черновая	90
23	Сверление	Черновая	100
24	Сверление	Черновая	15
25	Сверление	Черновая	30

3.2 Порядок выполнения практической работы

1. Согласно рекомендациям, приведенным в [3], необходимо выбрать подачу s , мм/об. При выборе подачи для сверления, требуется знать твердость обрабатываемого материала. Для конструкционных углеродистых сталей твердость можно рассчитать по приближительному выра-



Автоматизация производственных процессов

жению [2]: $HB \approx 3,2\sigma_B$.

2. Рассчитать скорость резания v для точения по формуле (3.1), а для сверления по формуле (3.2):

$$v = \frac{C_v}{T^m t^x s^y} K_v \quad (3.1)$$

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m s^y} K_v \quad (3.2)$$

Параметры, входящие в выражения (3.1) и (3.2), определяются по исходным данным и на основе рекомендаций [3].

3. Рассчитать составляющие силы резания P_z , P_y и P_x для точения по выражению (3.3), крутящий момент M_{KP} и осевую силу P_o для сверления по выражениям (3.4) и (3.5), соответственно:

$$P_{z,y,x} = 10C_p t^x s^y v^n K_p \quad (3.3)$$

$$M_{KP} = 10C_M D^q s^y K_p \quad (3.4)$$

$$P_o = 10C_p D^q s^y K_p \quad (3.5)$$

Параметры, входящие в выражения (3.3), (3.4), (3.5) определяются по исходным данным и на основе рекомендаций [3].

4. Полученные результаты занести в таблицу № 3.4 или таблицу № 3.5 в зависимости от варианта задания.

Таблица 3.4 – Ориентировочные значения режимов и сил резания при наружном продольном точении

Подача на оборот s , мм/об	Скорость резания v , м/мин	Составляющие силы резания, Н		
		P_z	P_y	P_x

Таблица 3.5 – Ориентировочные значения режимов



Автоматизация производственных процессов

резания, крутящего момента и осевой силы при сверлении

Подача на оборот s , мм/об	Период стойкости T , мин.	Скорость резания v , м/мин	Крутящий момент M_{KP} , Н·м	Осевая сила P_O , Н



4 СОСТАВЛЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Целью выполнения практической работы является получить основные навыки в формулировании и составлении концептуальных и математических моделей динамики технологических систем.

4.1 Вводные замечания

Концептуальная модель (расчетная схема) динамики технологической системы является основой для разработки математической модели системы.

В концептуальной модели необходимо, в первую очередь, отразить те свойства системы, которые представляют интерес с позиции поставленной задачи исследования. В связи с чем используются различные допущения и способы схематизации тех или иных характеристик системы. Основными элементами схематизации являются:

- 1) Рассматриваются системы с сосредоточенными массами которые, как правило, приводятся к соответствующим элементам, например, приведенная масса подсистемы инструмента, приведенная масса подсистемы заготовки.
- 2) Диссипативные характеристики системы заменяются приведенными элементами диссипации.
- 3) Характеристики жесткости элементов системы заменяются приведенными элементами жесткости.

В таблице № 4.1 показаны основные обозначения, единицы измерения приведенных характеристик массы, диссипации и жесткости, а на рисунке 4.1 показаны изображения на схемах резцов и сверл.

Таблица 4.1 – Приведенные характеристики технологических систем

(подсистема инструмента)

Название	Обозначение	Единица измерения	Обозначения на схемах
Масса	m	$\frac{кг \cdot с^2}{мм}$	 

Элемент диссипации	h	$\frac{кг \cdot с}{мм}$	
Элемент жесткости	c	$\frac{кг}{мм}$	

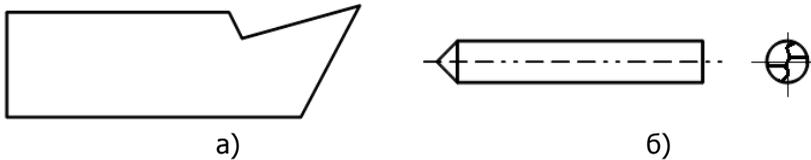


Рис. 4.1 – Графические обозначения резца и сверла, применяемые для изображения на расчетных схемах: а) резец; б) сверло

После составления концептуальной модели переходят к разработке математической модели системы. Так как системы резания относятся к механическим, то наиболее целесообразно использовать уравнение Лагранжа II-го рода (4.1) [4] для составления математической модели системы резания [5]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.1)$$

где T – кинетическая энергия i -го элемента; \dot{q}_i – обобщенная скорость i -го элемента; q_i – обобщенная координата i -го элемента; Q_i – сумма обобщенных сил по i -ой координате.

Сила диссипации F_D , сила жесткости (упругости) F_{yup} и сила резания P (в линейном представлении) определяются по выражениям (4.2), (4.3) и (4.4), соответственно:

$$F_D = h \cdot V = h \cdot \frac{dx}{dt}, \quad [кг] \quad (4.2)$$

$$F_{yup} = h \cdot c, \quad [кг] \quad (4.3)$$

$$P = \rho \cdot h \cdot c, \quad [кг] \quad (4.4)$$



где V – линейная скорость перемещения элемента, мм/мин; x – линейное перемещение элемента, мм; ρ – давление стружки на переднюю поверхность инструмента, кг/мм²; S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм.

4.2 Задание к выполнению практической работы

Для вариантов с 1 по 13 включительно: Разработать концептуальную и математическую модели, учитывающие взаимное влияние подсистемы инструмента и заготовки в радиальном направлении для процесса точения. Принять, что резец и заготовка обладают диссипацией и конечной жесткостью в радиальном направлении в остальных направлениях элементы технологической системы упругих деформационных смещений не совершают.

Для вариантов с 14 по 25 включительно: Разработать концептуальную и математическую модели, учитывающие взаимное влияние подсистемы инструмента и заготовки в осевом направлении для процесса сверления. Принять, что резец и заготовка обладают диссипацией и конечной жесткостью в осевом направлении в остальных направлениях элементы технологической системы упругих деформационных смещений не совершают.

4.3 Порядок выполнения практической работы

1. Разработать концептуальную модель динамической системы процесса резания.

2. На основе концептуальной модели, применяя управление Лагранжа II-го рода (4.1), а также уравнения сил (4.2), (4.3) и (4.4) составить математическую модель системы резания в общем виде в зависимости от координаты x .

3. Раскрыть зависимость силы резания от координаты перемещения $P(x)$. Следует отметить, что для процесса точения от варьирования радиальной координаты перемещения x , будет зависеть величина глубины резания t , то есть уравнение (4.1), по сути, необходимо заменить уравнением $P(x) = \rho \cdot S \cdot t(x)$. Для процесса сверления, от варьирования координаты перемещения x в осевом направлении, будет зависеть величина подачи S , то есть уравнение (4.1), по сути, необходимо заменить уравнением $P(x) = \rho \cdot S(x) \cdot t$.



Автоматизация производственных процессов

4. Определить параметр ρ , используя расчеты сил резания из практической работы № 3.



5 ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цели выполнения практической работы:

- получить навыки программирования математических моделей в пакетах численного моделирования;
- получить навыки использования математических пакетов для численного анализа динамики технологических систем.

5.1 Задание к выполнению практической работы

Заданием для выполнения данной практической работы является математическая модель технологической системы резания, полученная в практической работе № 4. Численные значения основных параметров – приведенных масс m_i , коэффициентов диссипации h_i и коэффициентов жесткости c_i , даны в таблице № 5.1.

Таблица 5.1 – Значения приведенных масс m_i , коэффициентов диссипации h_i и жесткости c_i по вариантам

Вар.	Подсистема инструмента			Подсистема заготовки		
	m_{II}	h_{II}	c_{II}	m_3	h_3	c_3
1	0,10	0,01	50	1	0,02	20
2	0,11	0,02	55	2	0,06	30
3	0,12	0,03	60	0,5	0,07	10
4	0,13	0,04	65	1	0,08	24
5	0,14	0,05	70	2	0,09	26
6	0,15	0,06	75	2	0,10	32
7	0,16	0,07	80	1	0,15	45
8	0,17	0,08	85	1	0,20	40

Автоматизация производственных процессов

9	0,18	0,09	90	0,8	0,01	20
10	0,19	0,10	95	0,2	0,02	80
11	0,20	0,15	100	4	0,06	23
12	0,21	0,20	50	1	0,01	45
13	0,22	0,01	55	0,4	0,02	32
14	0,23	0,02	60	0,13	0,03	12
15	0,10	0,03	65	0,14	0,04	54
16	0,11	0,04	70	0,15	0,05	23
17	0,12	0,05	75	0,16	0,06	34
18	0,13	0,06	80	0,17	0,07	36
19	0,14	0,07	85	0,18	0,08	42
20	0,15	0,08	90	0,23	0,01	58
21	0,16	0,09	95	0,10	0,02	21
22	0,17	0,10	100	0,11	0,06	64
23	0,18	0,15	50	0,12	0,01	28
24	0,19	0,20	55	0,13	0,02	52
25	0,20	0,01	60	0,14	0,03	25

5.2 Порядок выполнения практической работы

1. Записать математическую модель динамической системы резания в виде структурной схемы передаточных функций. Входным воздействием является вариация глубины резания. Выходными координатами будут: для точения – радиальные перемещения инструмента и заготовки, для сверления – осевые перемещения инструмента и заготовки.

2. Выполнить подстановку численных значений параметров системы.



Автоматизация производственных процессов

3. Создать структурную схему в графической среде математического пакета.
4. Выполнить пробное моделирование динамической системы.
5. На основе результатов пробного моделирования оценить: возможность нахождения решения выбранным методом численного интегрирования, точность полученных численных решений и время моделирования. В случае необходимости изменить метод численного моделирования, точность решения и время моделирования до приемлемых значений.
6. Исследовать динамику системы во временной области при варьировании ее параметров m_i , h_i , c_i и ρ .



6 СВЯЗЬ КОРНЕЙ С ВИДОМ РЕШЕНИЯ ОЛДУ 2-ГО ПОРЯДКА ВО ВРЕМЕНИ И НА ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ

Цели выполнения практической работы:

- получить базовые представления о изображении решений дифференциальных уравнений на фазовой плоскости;
- получить базовые представления о связи корней ОЛДУ 2-го порядка с решениями во временной области и на фазовой плоскости.

Задание к выполнению практической работы

Дано линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$a_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_0 x(t) = 0 \quad (6.1)$$

Требуется выполнить анализ его решений, исследуя корни характеристического уравнения λ_i ($i = 1, 2$), параметры σ и Δ , при различных значениях коэффициентов a_1 и a_0 .

Порядок выполнения практической работы

1. Записать уравнение (6.1) в нормальной форме Коши.
2. Записать выражения для нахождения корней характеристического уравнения λ_i ($i = 1, 2$) или использовать встроенную функцию для нахождения корней полиномов.
3. Записать выражения для нахождения σ и Δ через параметры a_1 и a_0 .
4. Реализовать структурную схему в графической среде математического пакета.
5. Варьируя значения параметров a_1 и a_0 получить решения дифференциального уравнения (6.1) во временной области и на фазовой плоскости, а также значения корней λ_i и параметров σ и Δ .
6. Результаты исследования занести в



таблицу № 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты исследования

Коэффициенты			Корни		Параметры				Решения		
a_2	a_1	a_0	Числен. значения		Тип корней	Численные значения			Соотношения	во времени	на фазовой плоскости
			λ_1	λ_2		σ	Δ	$\sigma^2 - 4\Delta$			
0,1	0,3	1									
0,1	0,8	1									
0,1	-0,3	1									
0,1	-0,8	1									
0,1	0	1									
0,1	0	-0,1									



7 ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ОКРЕСТНОСТИ ПРОСТОГО СОСТОЯНИЯ РАВНОВЕСИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ

Целью выполнения практической работы является изучить метод качественного анализа нелинейных динамических систем второго порядка в окрестности простого состояния равновесия.

7.1 Задание к выполнению практической работы

В таблице № 7.1 приведены дифференциальные уравнения для каждого варианта.

Таблица 7.1 – Нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка

Вар.	Уравнение
1	$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\frac{dx}{dt}x + 6x = 0$
2	$5\frac{d^2x}{dt^2} + 2\frac{dx}{dt} + 4x^3 + 2x = 0$
3	$2\frac{d^2x}{dt^2} + 5\frac{dx}{dt} + x^3 = 0$
4	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + 4x^3 = 0$
5	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + 3x^3 + x^2 + 5x = 0$
6	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + 3x^3 + 3x = 0$
7	$3\frac{d^2x}{dt^2} + 2\frac{dx}{dt} + 2x^2 + 2x = 0$
8	$3\frac{d^2x}{dt^2} + 2\frac{dx}{dt}x^3 + 2x = 0$

Автоматизация производственных процессов

9	$2\frac{d^2x}{dt^2} + 2\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 x^2 + x = 0$
10	$3\frac{d^2x}{dt^2} + 6\frac{dx}{dt} + 4\left(\frac{dx}{dt}\right)^5 - x^2 + x = 0$
11	$2\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + x^2 - 1 = 0$
12	$3\frac{d^2x}{dt^2} + 5\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + x^4 + x^2 + x = 0$
13	$3\frac{d^2x}{dt^2} + 5\frac{dx}{dt} + \left(1 - \frac{dx}{dt}\right)x^4 + x^2 + x = 0$
14	$3\frac{d^2x}{dt^2} + 2\frac{dx}{dt} + 2x^2 + 2x = 0$
15	$5\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + 4x^5 - 3x^4 - x^3 = 0$
16	$2\frac{d^2x}{dt^2} + 2\frac{dx}{dt} + x^3 - 2x = 0$
17	$\frac{d^2x}{dt^2} + (2-x)\frac{dx}{dt} + x^2 + x = 0$
18	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(5 + \frac{dx}{dt}\right)x - x^3 = 0$
19	$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 x^5 + 4x = 0$
20	$2\frac{d^2x}{dt^2} + 5\left(\frac{dx}{dt}\right) + x^2 - x^3 = 0$
21	$\frac{d^2x}{dt^2} + 5\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + \left(4 + \frac{dx}{dt}\right)x + x = 0$
22	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left[5\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + \frac{dx}{dt}\right]x + x = 0$



23	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left[5\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + x \right] \frac{dx}{dt} + x = 0$
24	$\frac{d^2x}{dt^2} + 4\frac{dx}{dt} + 7x^5 + x^3 = 0$
25	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + 3\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 + 2x = 0$

7.2 Порядок выполнения практической работы

1. Записать дифференциальное уравнение в виде

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = P(x, y), \\ \frac{dy}{dt} = Q(x, y) \end{cases}$$

2. Найти точки равновесия x_{0i} и y_{0i} из условия $\begin{cases} P(x, y) = 0, \\ Q(x, y) = 0 \end{cases}$

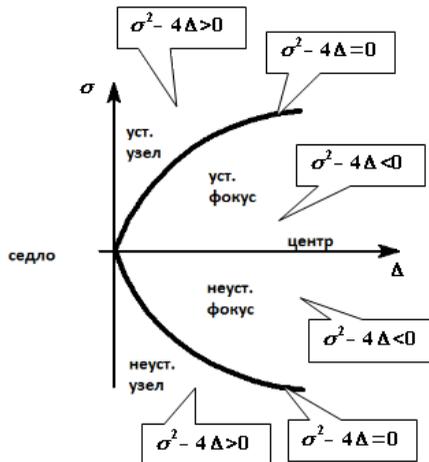
3. Найти значения

$$a = \left. \frac{\partial P(x, y)}{\partial x} \right|_{\substack{x = x_0 \\ y = y_0}} \quad b = \left. \frac{\partial P(x, y)}{\partial y} \right|_{\substack{x = x_0 \\ y = y_0}}$$

$$c = \left. \frac{\partial Q(x, y)}{\partial x} \right|_{\substack{x = x_0 \\ y = y_0}} \quad \text{и} \quad d = \left. \frac{\partial Q(x, y)}{\partial y} \right|_{\substack{x = x_0 \\ y = y_0}}$$

4. Вычислить параметры $\sigma = -(a + d)$, $\Delta = ad - bc$.

5. На основе анализа значений параметров σ и Δ по диаграмме, приведенной на рисунке 7.1 [6], сделать вывод о виде точки равновесия и фазовых траекторий в окрестности точки равновесия.

Рис. 7.1 – Диаграмма $\sigma - \Delta$ параметров

6. В том случае, если точка равновесия оказалась седлом, необходимо найти касательные к интегральным кривым по уравнению

$$y_i(x) = k_i(x - x_0) + y_0, \text{ при } i = 1, 2.$$

Значения коэффициентов k_i определяются из квадратного уравнения

$$bk^2 + (a - d)k - c = 0.$$

7. Повторить пункты 3 – 6 для всех точек равновесия с координатами x_0 и y_0 .

8. Нанести на фазовую плоскость все найденные точки равновесия и соответствующие им фазовые траектории. Если точка равновесия является седлом, то на фазовой плоскости необходимо отметить касательные.

9. Вычислить направления фазовых траекторий по системе

уравнений
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = P(X^*, Y^*) \\ \frac{dy}{dt} = Q(X^*, Y^*) \end{cases}, \text{ где } X^*, Y^* \text{ - координаты произвольной точки на фазовой плоскости.}$$

По знакам $\frac{dx}{dt}$ и $\frac{dy}{dt}$ определить направление вектора скорости изображающей точки (см. рис. 7.2).



Автоматизация производственных процессов

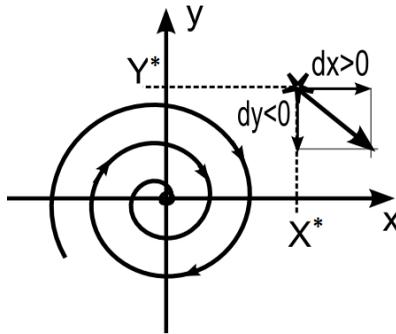


Рис. 7.2 – Вектор скорости изображающей точки

10. Сделать вывод о динамических свойствах системы в зависимости от начальных условий.



8 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЗНАЧЕНИЙ УПРАВЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА

Целью выполнения практической работы является изучение влияния на качественное изменение динамики технологической системы управляющего параметра.

8.1 Задание к выполнению практической работы

Варьируя значения управляющего параметра α , требуется определить каким образом будут изменяться динамические свойства системы. В таблице № 8.1 приведены дифференциальные уравнения для каждого варианта.

Таблица 8.1 – Нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка

Вар.	Уравнение
1	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} x + 6x = 0$
2	$5 \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \frac{dx}{dt} + \alpha x^3 + 2x = 0$
3	$\alpha \frac{d^2x}{dt^2} + 5 \frac{dx}{dt} + x^3 = 0$
4	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + 4x^3 = 0$
5	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + \alpha x^3 + x^2 + 5x = 0$
6	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + 3x^3 + 3x = 0$
7	$3 \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \frac{dx}{dt} + \alpha x^2 + 2x = 0$
8	$3 \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} x^3 + 2x = 0$

Автоматизация производственных процессов

9	$\alpha \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 x^2 + x = 0$
10	$3 \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} + 4 \left(\frac{dx}{dt} \right)^5 - x^2 + x = 0$
11	$2 \frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + \alpha x^2 - 1 = 0$
12	$3 \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + x^4 + x^2 + x = 0$
13	$3 \frac{d^2x}{dt^2} + 5 \frac{dx}{dt} + \alpha \left(1 - \frac{dx}{dt} \right) x^4 + x^2 + x = 0$
14	$3 \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \frac{dx}{dt} + \alpha x^2 + 2x = 0$
15	$5 \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + 4x^5 - 3x^4 - x^3 = 0$
16	$2 \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} + x^3 - 2x = 0$
17	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha(2-x) \frac{dx}{dt} + x^2 + x = 0$
18	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left(5 + \frac{dx}{dt} \right) x - x^3 = 0$
19	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 x^5 + 4x = 0$
20	$2 \frac{d^2x}{dt^2} + 5 \left(\frac{dx}{dt} \right) + \alpha x^2 - x^3 = 0$
21	$\frac{d^2x}{dt^2} + 5 \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + \alpha \left(4 + \frac{dx}{dt} \right) x + x = 0$
22	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left[5 \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + \frac{dx}{dt} \right] x + x = 0$



Автоматизация производственных процессов

23	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left[\alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + x \right] \frac{dx}{dt} + x = 0$
24	$\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} + 7x^5 + x^3 = 0$
25	$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + 2x = 0$

8.2 Порядок выполнения практической работы

1. Записать дифференциальное уравнение в виде

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = P(\alpha, x, y) \\ \frac{dy}{dt} = Q(\alpha, x, y) \end{cases} .$$
2. Запрограммировать дифференциальное уравнение, представленное в нормальной форме Коши, в математическом пакете.
3. Варьируя управляющий параметр α , построить ряд фазовых портретов системы.
4. Проанализировать влияние значений управляющего параметра α на динамические свойства системы.



ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Отчет должен включать:

- 1) Титульный лист.
- 2) Цель практической работы.
- 3) Исходные данные для варианта задания.
- 4) Решение задачи (математические выкладки, пояснения, графики и т.п.).



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобров В.Ф. Основы резания металлов. М., «Машиностроение», 1975, 344 с.
2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т., Т.2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2001, 944 с.
4. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: Учебник, Изд. «Лань», 2011. – 720 с.
5. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход, Ростов н/Д: «Терра», 2006. – 876 с.
6. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний, М.: Наука, 1981, 915 с.