

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

Кафедра автоматизации технологических процессов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**по дисциплине
«Проектирование металлообрабатывающих станков»**



Уфа 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра автоматизации технологических процессов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине
«Проектирование металлообрабатывающих станков»

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ

Уфа 2022

Авторы-составители: Е. М. Дурко, С. И. Фецак

Лабораторный практикум по дисциплине «Проектирование металлообрабатывающих станков» [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т ; [авт.-сост. : Е. М. Дурко, С. И. Фецак]. – Уфа : УГАТУ, 2022. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EI_izd/2022-29.pdf

Приведены задания для лабораторных работ по дисциплине «Проектирование металлообрабатывающих станков» раздел «Динамика станков», даны рекомендации по порядку выполнения и представлений результатов работы.

Лабораторный практикум предназначен для студентов, изучающих дисциплины «Проектирование металлообрабатывающих станков» по направлению подготовки бакалавров 15.03.02 Технологические машины и оборудование и «Проектирование мехатронных станков» специальности 15.05.01 Проектирование технологических машин и комплексов

Рецензент канд. техн. наук, доцент Идрисова Ю.В.

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Авторы-составители: *Дурко Евгений Маркович*
Фецак Сергей Игоревич

Редактирование и верстка *Р. М. Мухамадиева*
Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Подписано к использованию: 14.03.2022
Объем: 0,93 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.
Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: rik@ugatu.su

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении и эксплуатации станков возникает необходимость решения задач, связанных с динамикой явлений. В первую очередь это относится к обеспечению условий устойчивого движения инструмента и заготовки, т. е. отсутствию так называемых вибраций, «подрывания», «заклинивания» (при скольжении) или скачкообразного перемещения узлов. Существенным является обеспечение достаточной долговечности системы станка при различных внешних воздействиях.

Существует много различных теорий и методик, позволяющих оценить динамические явления в машине. Однако оценка динамического качества станка возможна только на основе представления о замкнутости динамической системы станка. Эта замкнутость определяется взаимодействием элементов упругой системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» с рабочими процессами, протекающими в подвижных соединениях этих элементов, т. е. процессами резания, трения, электромагнитными, гидродинамическими, тепловыми и т. п. Отсюда вытекают три характерные особенности динамики станков.

Первая – комплексность: она расположена на стыке многих научных дисциплин.

Вторая – наличие широкого диапазона изменения параметров динамической системы станка.

Третья – единство задач холостого и рабочего режимов работы станка.

Несмотря на большое разнообразие задач, возникающих при исследовании динамики станков, возможен единый подход к их решению и пониманию сути происходящих явлений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА

Цель работы: изучение и освоение методик расчетного определения динамических характеристик упругой системы станка

Задание: ознакомиться с методикой и провести теоретические исследования упругой системы металлорежущего станка с помощью ЭВМ: разработать динамическую модель станка и теоретически определить статическую и динамические характеристики упругой системы, построить амплитудную и амплитудно-фазовую частотные характеристики.

1.1. Понятие о динамических характеристиках упругой системы станка

Упругая система (УС) включает в себя станок, приспособление, инструмент, деталь и представляет собой силовой контур, воспринимающий нагрузки, возникающие в том или ином рабочем процессе (процессе резания, трения и др.). Упругая система является элементом динамической системы металлорежущего станка (рис. 1.1, *а*) и взаимодействует с рабочим процессом (например, процессом резания) силой резания P и упругими деформациями y . Если рассматривать УС как элемент системы (рис. 1.1, *б*), то входным параметром этого элемента является силовое воздействие рабочего процесса, а выходным – упругая деформация несущей системы.

Характеристики УС определяются следующими основными параметрами: массами и моментами инерции узлов и деталей; жесткостью упругих элементов, включая стыки; силами неупругого сопротивления (демпфирования); связями между массами в системе со многими степенями свободы.

Характеристиками УС являются:

– **статическая характеристика**, определяемая отношением выходного параметра y к входному P в установившемся режиме (податливость несущей системы станка)

$$K_{yc} = \frac{y}{P};$$

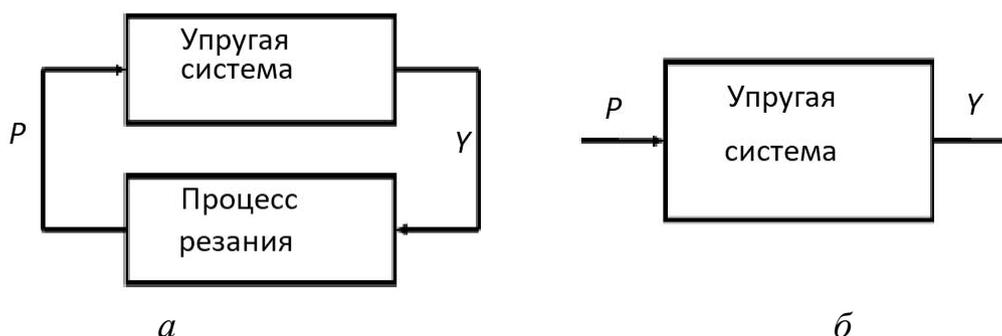


Рис. 1.1. Динамическая (а) и упругая (б) системы станка

– **переходная характеристика**, показывающая изменение выходного параметра y во времени при ступенчатом или импульсном изменении входного P ;

– **частотные характеристики** (амплитудная, фазовая и амплитудно-фазовая), показывающие изменение соответствующих значений выходного параметра y от частоты при гармоническом изменении входного P .

Переходная и частотные характеристики относятся к динамическим характеристикам, показывающим изменение выходного параметра во времени.

При расчете динамических характеристик реальную УС станка (рис. 1.2, а) заменяют расчетной схемой (рис. 1.2, б), т. е. системой с конечным числом степеней свободы.

Расчетная схема должна быть, с одной стороны, эквивалентна реальной системе станка с достаточной для исследования точностью, с другой – максимально проста и сведена к минимальному количеству сосредоточенных масс и связей.

Расчетная схема станка представляется в виде некоторого количества сосредоточенных масс, соединенных упругими и диссипативными (рассеивающими энергию колебаний) элементами. Построенная таким образом расчетная схема позволяет описать динамику УС станка системой линейных дифференциальных уравнений второго порядка.

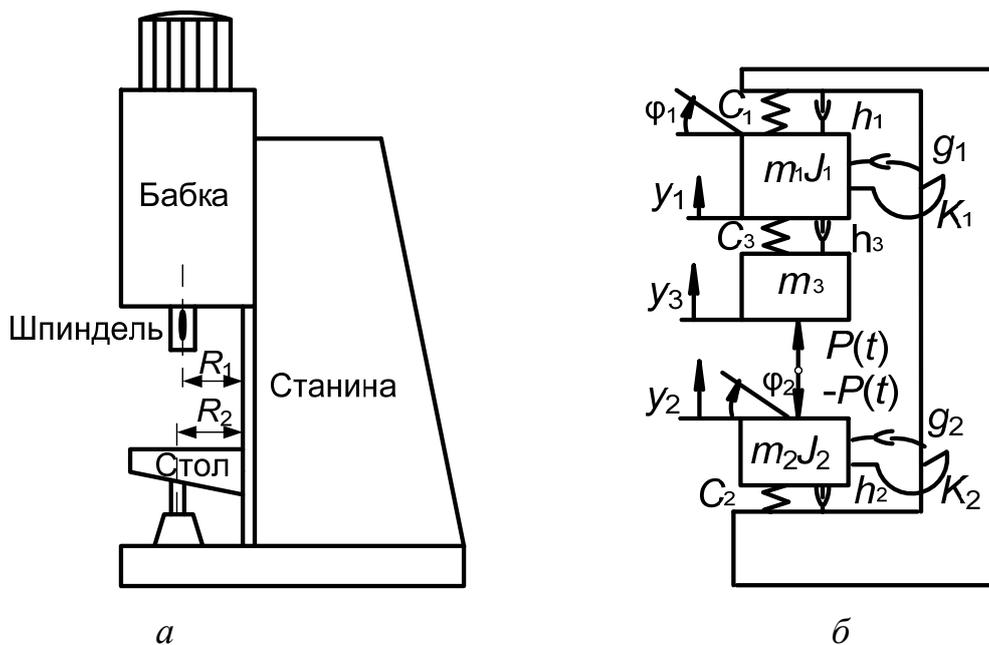


Рис. 1.2. Компоновка (а) и расчетная схема (б) станка

Выполнив с дифференциальными уравнениями преобразование Лапласа получим систему алгебраических уравнений, к которым можно применить известные математические методы (например, теорему Крамера) для определения выходного параметра системы – деформации УС (в операторной форме).

Передаточная функция системы $W_{yc}(p)$ определяется отношением лапласового изображения выходного параметра $y(p)$ к лапласовому изображению входного $P(p)$

$$W_{yc}(p) = \frac{y(p)}{P(p)}.$$

Частотные характеристики УС определяются из передаточной функции $W_{yc}(p)$ подстановкой вместо оператора p его значения $i\omega$. Выделив в полученном выражении вещественную $Re(\omega)$ и мнимую $Jm(\omega)$ части, получим комплексную (амплитудно-фазовую) частотную характеристику $W_{yc}(j\omega)$

$$W_{yc}(j\omega) = Re(\omega) + jJm(\omega), \tag{1.1}$$

которую можно построить на комплексной плоскости в декартовых координатах с вещественной и мнимой осями.

Амплитудная $A_{yc}(\omega)$ и фазовая $\varphi_{yc}(\omega)$ частотные характеристики определяются выражениями (имея в виду, что значение амплитуды представляет собой модуль, а значение фазы – аргумент вектора годографа частотной характеристики)

$$A_{yc}(\omega) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)}; \quad (1.2)$$

$$\varphi_{yc}(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}. \quad (1.3)$$

Имея эти выражения можно построить комплексную частотную характеристику в полярных координатах

$$W_{yc}(j\omega) = A_{yc}(\omega) \cdot e^{j\varphi_{yc}(\omega)}. \quad (1.4)$$

Примеры амплитудной (АЧХ) и комплексной (АФЧХ) частотных характеристик показаны на рис. 1.3, а и 1.3, б соответственно.

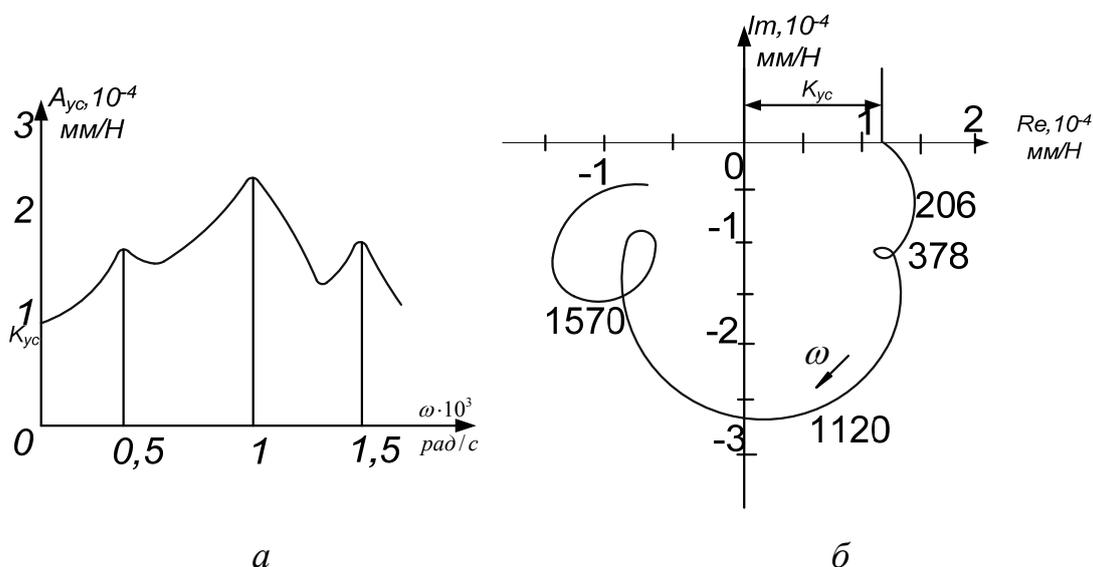


Рис. 1.3. Частотные характеристики упругой системы

Число форм колебаний на подобных графиках зависит от числа сосредоточенных масс и моментов инерции узлов и деталей станка, представленных в расчетной модели.

1.2. Теоретическое определение динамических характеристик упругой системы станка

В настоящей работе определение динамических характеристик УС осуществляется на примере вертикально-сверлильного станка, компоновка и расчетная схема которого показаны на рис. 1.2. Расчетная схема (модель) представлена упрощенной с выделением наиболее влиятельных элементов станка: шпиндельной бабки (m_1, J_1), шпиндельного узла (m_3) и стола (m_2, J_2). Стойка, основание станка и стык между ними приняты абсолютно жесткими и неподвижными относительно фундамента.

Динамическая модель описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} m_3 y_3 + h_3 (y_3 - y_1) + C_3 (y_3 - y_1) &= P; \\ m_1 y_1 + h_1 y_1 + C_1 y_1 + h_3 (y_1 - y_3) + C_3 (y_1 - y_3) &= 0; \\ J_1 \varphi_1 + g_1 \varphi_1 + K_1 \varphi_1 + h_3 (\varphi_1 R_1 - y_3) R_1 + C_3 (\varphi_1 R_1 - y_3) R_1 &= 0; \\ m_2 y_2 + h_2 y_2 + C_2 y_2 &= -P; \\ J_2 \varphi_2 + g_2 \varphi_2 + K_2 \varphi_2 + h_2 \varphi_2 R_2^2 + C_2 \varphi_2 R_2^2 &= -PR_2, \end{aligned} \right\}$$

где $y_1, y_2, y_3, \varphi_1, \varphi_2$ – линейные и угловые деформации элементов УС;

m_1, m_2, m_3, J_1, J_2 – массы и моменты инерции узлов;

h_1, h_2, h_3, g_1, g_2 – линейные и угловые диссипативные связи (демпфирование); φ

C_1, C_2, C_3, K_1, K_2 – линейные и угловые жесткости стыков;

R_1, R_2 – плечи действия сил на элементы УС относительно стыков «шпиндельная бабка – стойка» и «стол – стойка» (на рис. 1.2 не показаны);

P – внешняя сила, действующая на УС.

Сделав преобразование Лапласа и сгруппировав коэффициенты относительно переменных, получим систему уравнений в операторной форме записи

$$\left. \begin{aligned} (m_3 p^2 + h_3 p + C_3) y_3 - (h_3 p + C_3) y_1 &= P; \\ (m_1 p^2 + h_1 p + h_3 p + C_1 + C_3) y_1 - (h_3 p + C_3) y_3 &= 0; \\ (J_1 p^2 + g_1 p + h_3 R_1^2 p + K_1 + C_3 R_1^2) \varphi_1 - (h_3 R_1 p + C_3 R_1) y_3 &= 0; \\ (m_2 p^2 + h_2 p + C_2) y_2 &= -P; \\ \left(\frac{J_2}{R_2} p^2 + \frac{g_2}{R_2} p + h_2 R_2 p + \frac{K_2}{R_2} + C_2 R_2 \right) \varphi_2 &= -P. \end{aligned} \right\}$$

Деформация УС, приведенная к зоне резания, определяется алгебраической разностью деформаций шпиндельного узла y_3 и стола y_2 :

$$y = y_3 - y_2, \quad (1.5)$$

которые можно определить, используя теорему Крамера:

$$y_2 = \frac{\Delta_{y_2}}{\Delta} \quad \text{и} \quad y_3 = \frac{\Delta_{y_3}}{\Delta}, \quad \text{б} \quad (1.6)$$

где Δ – главный определитель системы уравнений;

Δ_{y_2} и Δ_{y_3} – определители, полученные заменой соответствующего столбца главного определителя (коэффициенты при y_2 или y_3) свободными членами системы уравнений.

Для нахождения определителей следует записать систему уравнений в полном виде

$$\left. \begin{aligned} b_{11} \varphi_1 + b_{12} \varphi_2 + b_{13} y_1 + b_{14} y_2 + b_{15} y_3 &= P; \\ b_{21} \varphi_1 + b_{22} \varphi_2 + b_{23} y_1 + b_{24} y_2 + b_{25} y_3 &= 0; \\ b_{31} \varphi_1 + b_{32} \varphi_2 + b_{33} y_1 + b_{34} y_2 + b_{35} y_3 &= 0; \\ b_{41} \varphi_1 + b_{42} \varphi_2 + b_{43} y_1 + b_{44} y_2 + b_{45} y_3 &= -P; \\ b_{51} \varphi_1 + b_{52} \varphi_2 + b_{53} y_1 + b_{54} y_2 + b_{55} y_3 &= -P, \end{aligned} \right\},$$

где

$$b_{11} = b_{12} = b_{14} = b_{21} = b_{22} = b_{24} = b_{32} = b_{33} = b_{34} = b_{41} = b_{42} = b_{43} = b_{45} = b_{51} = b_{53} = b_{54} = b_{55} = 0;$$

$$b_{13} = -(h_3 p + C_3);$$

$$b_{15} = m_3 p^2 + h_3 p + C_3;$$

$$b_{23} = m_1 p^2 + h_1 p + h_3 p + C_1 + C_3;$$

$$b_{25} = -(h_3 p + C_3);$$

$$b_{31} = J_1 p^2 + g_1 p + h_3 R_1^2 p + K_1 + C_3 R_1^2;$$

$$b_{35} = -(h_3 R_1 p + C_3 R_1);$$

$$b_{44} = m_2 p^2 + h_2 p + C_2;$$

$$b_{52} = \frac{J_2}{R_2} p^2 + \frac{g_2}{R_2} p + h_2 R_2 p + \frac{K_2}{R_2} + C_2 R_2.$$

Сформировав из полной системы уравнений интересующие нас определители

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b_{13} & 0 & b_{15} \\ 0 & 0 & b_{23} & 0 & b_{25} \\ b_{31} & 0 & 0 & 0 & b_{35} \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 \\ 0 & b_{52} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \Delta_{y_2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b_{13} & P & b_{15} \\ 0 & 0 & b_{23} & 0 & b_{25} \\ b_{31} & 0 & 0 & 0 & b_{35} \\ 0 & 0 & 0 & -P & 0 \\ 0 & b_{52} & 0 & -P & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{y_3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b_{13} & 0 & P \\ 0 & 0 & b_{23} & 0 & 0 \\ b_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & -P \\ 0 & b_{52} & 0 & 0 & -P \end{pmatrix}$$

и вычислив их известным способом, можно определить передаточную функцию УС, используя приведенные выше выражения (1.5) и (1.6)

$$W_{yc}(p) = \frac{y(p)}{P(p)} = \frac{1}{P} \cdot \frac{\Delta y_3 - \Delta y_2}{\Delta}.$$

Приравняв в этом выражении оператор $p = 0$, получим значение статической характеристики (податливости) упругой системы K_{yc} .

Заменяя оператор p на его значение $j\omega$ и выделив вещественную и мнимую составляющие, определяются и строятся графически амплитудная и амплитудно-фазовая частотные характеристики УС, используя выражения (1.1), (1.2), (1.3) и (1.4).

Варианты исходных данных для теоретического определения динамических характеристик УС приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

1.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными понятиями о динамических характеристиках упругой системы станка.

2. Ознакомиться с методикой теоретического определения динамических характеристик упругой системы.

3. Для заданного варианта исходных данных (табл. 1.1 и 1.2) с помощью ЭВМ рассчитать параметры статической характеристики, амплитудной и комплексной частотных характеристик, построить графики АЧХ и АФЧХ.

Примечание: для анализа динамических характеристик и построения необходимых графиков может быть использовано ПО *MathLab*.

1.4. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Исходные данные для теоретического определения характеристик упругой системы станка.

3. Основные математические выражения для определения статической и динамических характеристик расчетным методом.

4. Расчет податливости упругой системы, таблицы и графики АЧХ и АФЧХ, полученные расчетным путем.

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой упругая система станка?
2. Назовите и охарактеризуйте основные характеристики, определяющие динамические свойства упругой системы станка;
3. Что представляет собой расчетная схема упругой системы?
4. Каков принцип составления динамической (математической) модели упругой системы и выражения ее передаточной функции?
5. Как получить выражения для определения частотных характеристик упругой системы?
6. Как влияют упруго-инерционные параметры упругой системы на ее характеристики?

Список литературы

Дурко Е.М., Фецак С.И., Идрисова Ю.В. Динамика станков: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2014. 130 с.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета динамических характеристик упругой системы станка

№ варианта	Приведенная масса узла, кг			Момент инерции узла, кг · м ² /рад		Коэффициент линейного демпфирования, кг/с		
	m_1	m_2	m_3	J_1	J_2	h_1	h_2	h_3
1	100	50	15	10	5	200	50	100
2	100	50	15	0	5	200	50	100
3	150	75	15	0	10	300	75	100
4	150	75	15	15	10	300	75	100
5	200	100	30	20	0	400	100	150
6	250	125	30	25	0	300	75	100
7	200	100	30	20	15	400	100	150
8	0	50	15	10	5	0	50	100
9	0	125	45	30	15	0	50	200
10	250	125	30	25	10	300	75	100
11	150	0	15	15	10	300	0	100
12	200	0	30	20	15	400	0	150
13	300	125	45	30	15	400	50	200
14	100	50	15	0	0	200	50	100
15	250	125	30	0	0	300	75	100

Таблица 1.2

Исходные данные для расчета динамических характеристик
упругой системы станка

№ варианта	Коэффициент углового демпфирования, кг·м ² /с		Линейная жесткость стыка ×10 ⁷ , Н/м			Угловая жесткость стыка ×10 ⁷ , Н·м/рад		Плечо действия силы, м	
	g ₁	g ₂	C ₁	C ₂	C ₃	K ₁	K ₂	R ₁	R ₂
1	30	30	1,0	0,5	0,1	0,5	0,1	0,2	0,2
2	0	30	1,0	0,5	0,1	0	0,1	0	0,2
3	0	100	2,0	1,0	0,4	0	0,2	0	0,2
4	70	100	2,0	1,0	0,4	0,8	0,2	0,2	0,2
5	150	0	1,5	2,0	0,3	0,6	0	0,3	0
6	200	0	3,0	1,2	0,2	1,0	0	0,3	0
7	150	50	1,5	2,0	0,3	0,6	0,5	0,3	0,3
8	30	30	0	0,5	0,1	0,5	0,1	0,2	0,2
9	100	100	0	1,5	0,5	0,6	0,4	0,2	0,2
10	200	70	3,0	1,2	0,2	1,0	0,3	0,3	0,3
11	70	100	2,0	0	0,4	0,8	0,2	0,2	0,2
12	150	50	1,5	0	0,3	0,6	0,5	0,3	0,3
13	100	100	1,5	1,5	0,5	0,6	0,4	0,2	0,2
14	0	0	1,0	0,5	0,1	0	0	0	0
15	0	0	3,0	1,2	0,5	0	0	0	0

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Цель работы: изучение и освоение методик расчетного определения динамических характеристик процесса резания.

Задание: ознакомиться с методикой и провести теоретические исследования характеристик процесса резания: теоретически определить динамические характеристики процесса резания, построить амплитудно-фазовую частотную характеристику и график переходного процесса.

2.1. Понятие о динамических характеристиках процесса резания

Процесс резания (ПР) является элементом динамической системы металлорежущего станка (рис. 2.1, *а*) и взаимодействует с упругой системой (станок – приспособление – инструмент – деталь) силой резания P и упругими деформациями y . При работе станка изменение параметров ПР вызывает изменение силы резания P , что приводит к изменению взаимного положения инструмента и детали y (по нормали к плоскости резания), а это, в свою очередь, – к изменению сечения срезаемого слоя, следовательно, силы резания, которая изменяет деформацию упругой системы станка и т. д. От характеристик ПР, как и от характеристик упругой системы, зависит виброустойчивость станка, т. е. его способность производить обработку без вибраций, в устойчивом режиме.

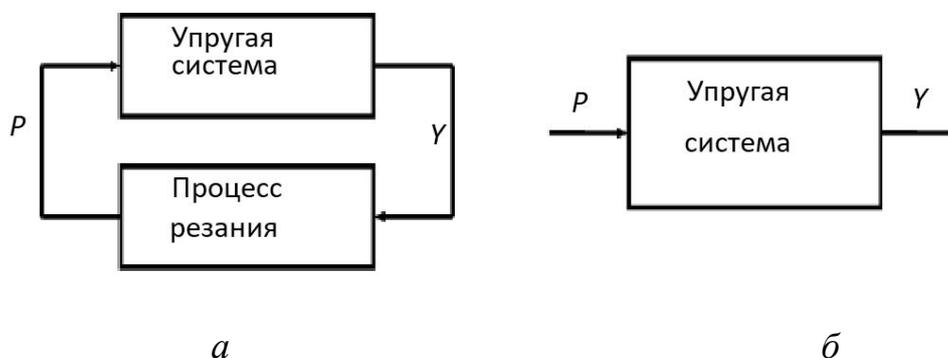


Рис. 2.1. Динамические модели станка (а) и процесса резания (б)

Процесс резания, как элемент динамической системы (рис. 2.1, б), представляет собой достаточно сложную собственную многоконтурную систему, однако с достаточным для практических целей приближением его можно описать дифференциальным уравнением первого порядка

$$T_p P + P = K_p y,$$

где y – входной параметр (входная координата) элемента ПР, мм;

P – выходной параметр (выходная координата) элемента ПР, Н.

K_p – статическая характеристика ПР (коэффициент резания), Н/мм;

T_p – постоянная времени стружкообразования, с.

Динамическая характеристика ПР определяется отношением лапласовых изображений выходного параметра элемента $P(p)$ к входному $y(p)$.

$$W_p(p) = \frac{P(p)}{y(p)} = \frac{K_p}{T_p p + 1},$$

где $W_p(p)$ – передаточная функция процесса резания.

Подставив в выражение передаточной функции вместо оператора p его значение $j\omega$ получим выражение комплексной (амплитудно-фазовой) частотной характеристики (АФЧХ) процесса резания $W_p(j\omega)$

$$W_p(j\omega) = \frac{K_p}{T_p(j\omega) + 1},$$

которую можно представить в декартовой системе координат

$$W_p(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) = \frac{K_p}{T_p^2 \omega^2 + 1} - j \frac{K_p T_p \omega}{T_p^2 \omega^2 + 1} \quad (2.1)$$

или в полярной системе координат

$$W_p(j\omega) = A_p(\omega) \cdot e^{j\Phi_p(\omega)},$$

где $Re(\omega)$ и $Im(\omega)$ – вещественная и мнимая координаты;

ω – угловая частота, рад/с;

$A_p(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика элемента, модуль

$$A_p(\omega) = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)}, \quad (2.2)$$

$\varphi_p(\omega)$ – фазовая частотная характеристика элемента, аргумент

$$\varphi_p(\omega) = \arctg \frac{Im(\omega)}{Re(\omega)}. \quad (2.3)$$

Если в дифференциальное уравнение элемента подставить значение входного параметра

$$y = 1(\tau),$$

т. е. выражение единичной ступенчатой функции, и решить это уравнение, получим переходную функцию ПР (переходную характеристику) при ступенчатом изменении взаимного положения детали и инструмента y (или припуска на обработку):

$$P = K_p(1 - e^{-\tau/T_p}), \quad (2.4)$$

где τ – время, аргумент.

Примеры АФЧХ и переходной характеристики процесса резания как инерционного динамического звена показаны на рис. 2.2 и 2.3 соответственно.

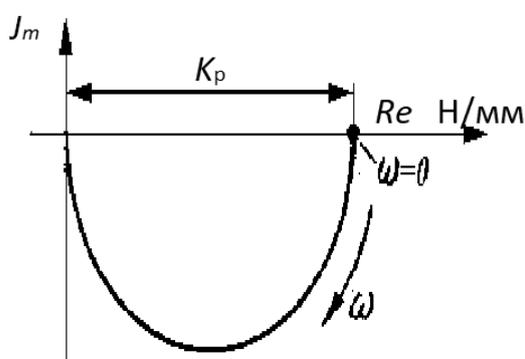


Рис. 2.2. АФЧХ процесса резания

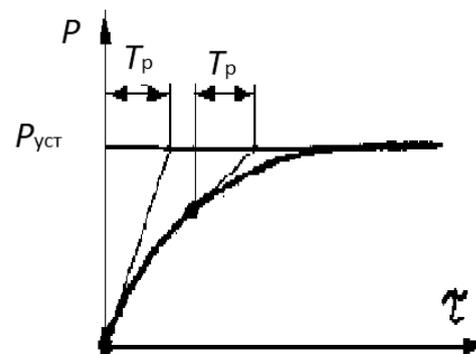


Рис. 2.3. Переходная характеристика процесса резания

На этих графиках отмечены параметры K_p и T_p , входящие в уравнение элемента ПР.

2.2. Теоретическое определение динамических характеристик процесса резания

Теоретическое определение динамических характеристик ПР сводится к вычислению значений параметров выражения передаточной функции $W_p(p)$ и построению графиков АФЧХ и переходной функции процесса резания.

Коэффициент резания K_p определяется выражением

$$K_p = (1,3...1,5)\sigma_e b \xi,$$

где σ_e – временное сопротивление обрабатываемого материала, МПа;

b – ширина срезаемого слоя, мм;

ξ – коэффициент усадки стружки.

Ширина срезаемого слоя b зависит от глубины резания t , мм, и переднего угла резца в плане φ (рис. 2.4)

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}.$$

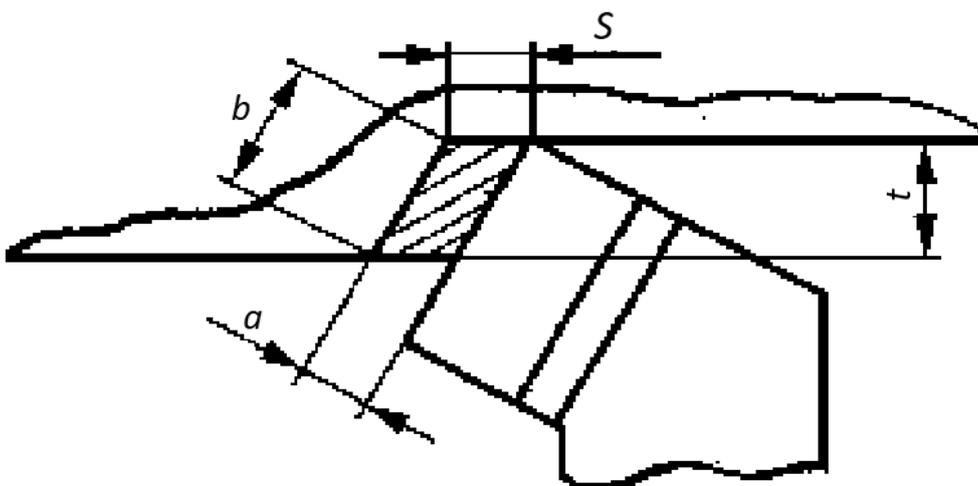


Рис. 2.4. Сечение срезаемого слоя

Коэффициент усадки стружки ξ зависит от многих параметров, определяющих процесс резания: свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, смазывающе-охлаждающей среды и т. д. При динамических расчетах можно принять средние значения этого параметра: для сталей средней твердости $\xi = 2,5 \dots 4,5$; для меди и алюминия $\xi = 4 \dots 7$; для чугуна $\xi = 1,5 \dots 2,5$.

Значение постоянной времени стружкообразования T_p определяется выражением

$$T_p = \frac{m}{n} \cdot \frac{a\xi \cdot 60}{V \cdot 10^3},$$

где m – коэффициент, учитывающий положение силы резания по длине линии сдвига металла при стружкообразовании;

n – коэффициент, учитывающий положение силы резания по длине контакта стружки с передней поверхностью резца;

a – толщина срезаемого слоя, мм;

V – скорость резания, м/мин.

Отношение m/n (безразмерный коэффициент) следует принимать: для сталей – 4, для меди и алюминиевых сплавов – 3,5.

Толщина срезаемого слоя a (рис. 2.4) зависит от подачи инструмента за один оборот детали (например, при обработке на токарном станке) S , мм/об, и переднего угла резца в плане φ

$$a = S \cdot \sin \varphi.$$

Подставив значения коэффициента резания K_p и постоянной времени стружкообразования T_p в выражения (2.1) или (2.2) и (2.3), строится график АФЧХ процесса резания на комплексной плоскости в координатах Re и Im для различных значений частоты ω (рад/с), имея в виду, что рабочий частотный диапазон станка реально лежит в пределах $0 \dots 3000$ рад/с ($0 \dots 500$ Гц). Шаг изменения частоты ω рекомендуется принимать меньшим ($5 \dots 10$ рад/с) при малых частотах, и увеличивать с возрастанием частоты (до $100 \dots 200$ рад/с).

Переходная характеристика ПР строится в координатах «время – сила резания» по выражению (2.4), подставив в него значения

K_p и T_p . При построении графика можно считать, что практически переходный процесс заканчивается при $\tau = 3T_p$.

Варианты исходных данных для теоретического определения динамических характеристик процесса резания по приведенным выше формулам представлены в табл. 2.1.

2.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными понятиями о динамических характеристиках процесса резания.

2. Ознакомиться с методикой теоретического определения динамических характеристик процесса резания.

3. Для заданного варианта исходных данных (см. табл. 2.1) рассчитать параметры переходного процесса и комплексной частотной характеристики, построить графики переходной функции и АФЧХ процесса резания.

Примечание: для анализа динамических характеристик процесса резания и построения необходимых графиков может быть использовано ПО *MathLab*.

Таблица 2.1

Варианты исходных данных для расчетов

№ варианта	Обрабатываемый материал; <i>bв</i> , МПа	Скорость резания <i>V</i> , м/мин	Глубина резания <i>t</i> , мм	Подача <i>S</i> , мм/об	Угол резца в плане ϕ , град	Коэфф. усадки ξ
1	Сталь; 340	450	3,0	0,3	90	4,2
2	Сталь; 560	400	3,5	0,3	60	3,0
3	Сталь; 650	300	2,5	0,25	45	2,8
4	Сталь; 730	200	3,0	0,25	90	2,0
5	Сталь; 820	150	2,0	0,2	60	3,5
6	Сталь; 900	100	1,5	0,15	45	2,6
7	Сталь; 1100	100	1,0	0,07	90	2,0
8	Медь; 220	250	3,0	0,25	45	6,0
9	Медь; 340	350	3,0	0,15	90	4,5
10	Алюм.; 150	200	4,0	0,3	45	5,0
11	Алюм.; 300	350	3,0	0,2	60	4,0
12	Сп.Д16; 420	400	3,0	0,2	90	2,0
13	Чугун; 150	300	2,5	0,15	45	1,5
14	Чугун; 210	200	1,5	0,25	60	2,0
15	Чугун; 400	100	3,0	0,35	90	2,5

2.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные для теоретического определения динамических характеристик процесса резания.
3. Основные математические выражения для определения характеристик расчетным методом.
4. Таблицы и графики переходной функции и АФЧХ процесса резания.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Назовите и охарактеризуйте основные характеристики, определяющие динамические свойства процесса резания.
2. Уравнением какого динамического звена можно описать процесс резания и почему?
3. Что представляет собой коэффициент резания и от чего он зависит?
4. Что собой представляет постоянная времени стружкообразования и от чего она зависит?
4. Как влияют параметры и условия резания на статическую и динамические характеристики процесса резания?

Список литературы

Дурко Е.М., Фецак С.И., Идрисова Ю.В. Динамика станков: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2014. 130 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА

Цель работы: изучение и освоение методики расчетного определения виброустойчивости металлорежущего станка с использованием ЭВМ.

Задание: ознакомиться с методикой и провести теоретические исследования виброустойчивости металлорежущего станка:

1) построить с использованием компьютерной программы *MathLab* динамические модели станка по связи с процессом резания при обработке «по чистому» и «по следу»;

2) построить амплитудно-фазовые частотные характеристики условно разомкнутых динамических моделей станка для различных значений параметров входящих в них элементов;

3) оценить влияние параметров упругой системы, процесса резания и частоты вращения шпинделя на виброустойчивость станка и сделать выводы по работе.

3.1. Понятие о виброустойчивости металлорежущего станка

Виброустойчивость металлорежущего станка оценивается по связи упругой системы УС с процессом резания ПР (рис. 3.1). Рабочий процесс ПР оказывает силовое воздействие на УС, вызывая упругие смещения ее конструктивных элементов, что, в свою очередь, приводит к смещению заготовки относительно инструмента u . Последнее приводит к изменению сечения срезаемого слоя, т. е. силы резания P , которая изменяет деформационное состояние УС и т. д. В результате взаимного влияния элементов динамической системы друг на друга возникают колебания УС станка (вибрации), приводящие к появлению волнистости на обработанной поверхности, снижению стойкости или даже поломке инструмента и т. п.



Рис. 3.1. Динамическая система станка по связи с процессом резания

Система является устойчивой, если возникшие в ней колебания с течением времени уменьшаются по амплитуде, и неустойчивой, если амплитуда возрастает или остается постоянной (отсутствие возрастания амплитуды определяется проявлением нелинейностей элементов при значительных смещениях заготовки и инструмента друг относительно друга).

С точки зрения виброустойчивости станка следует различать характер обработки: без повторного прохождения инструмента по ранее обработанной поверхности (обработка «по чистому») или с проходом режущей кромки по этой поверхности спустя некоторое время (обработка «по следу»).

Примером резания «по чистому» является нарезание винтовой канавки резцом на токарном станке, когда режущая кромка инструмента не попадает вторично в одно и то же место канавки. Обработка «по следу» более распространена и встречается практически на всех станках, когда режущая кромка проходит по следу от предыдущего прохода (например, при обточке цилиндра на токарном станке след обработки в виде переменного припуска, образовавшегося при относительных колебаниях инструмента и заготовки, вновь приходит к резцу через один оборот детали) или от впереди идущей режущей кромки при работе многолезвийным инструментом (сверлом, фрезой и т. п.).

3.2. Динамические модели станка

Динамические модели станка при обработке «по чистому» или «по следу» отличаются как совокупностью элементов, так и связями, возникающими между ними.

Модель станка при обработке «по чистому» представляет собой одноконтурную динамическую систему (рис. 3.2, а), укрупненно состоящую из двух элементов – УС и ПР с передаточными функциями W_{yc} и W_p соответственно, каждый из которых в общем случае является сложной подсистемой со своими звеньями и связями.

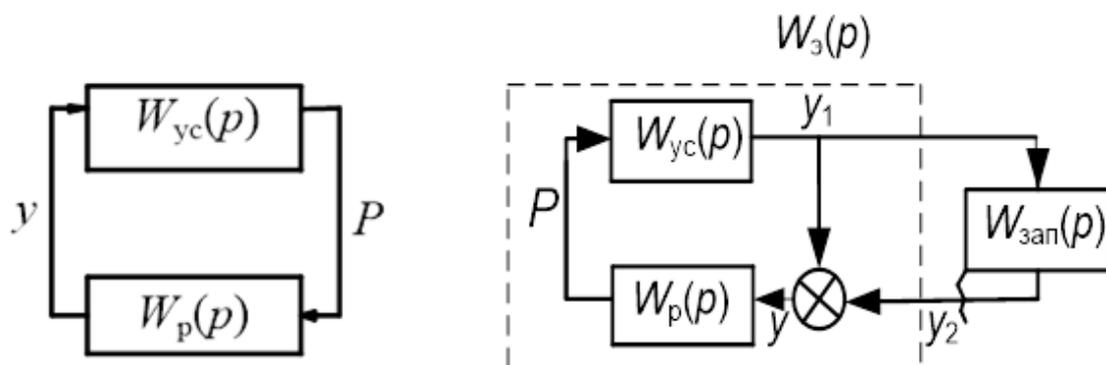


Рис. 3.2. Динамическая модель станка

Модель станка при обработке «по следу» включает еще один элемент – звено запаздывания (ЗЗ) (рис. 3.2, б) с передаточной функцией $W_{зап}$, отражающее прохождение режущей кромки по своему следу от предыдущего прохода. От влияния этого следа амплитуда колебаний УС (колебания инструмента относительно заготовки) может возрастать или уменьшаться в зависимости от фазы сложения сигналов возмущения на ПР.

3.3. Передаточные функции элементов динамической модели станка

В работе исследуется виброустойчивость вертикально-сверлильного станка при сверлении отверстия в детали. Эта же методика справедлива и для других типов станков и инструментов.

Для упрощения процесса исследования и сокращения времени выполнения лабораторной работы УС станка (рис. 3.3, а) принята

двухмассовой (m_1 и m_2) с линейными упругими (C_1 и C_2) и диссипативными (h_1 и h_2) связями. На УС действует сила резания P .

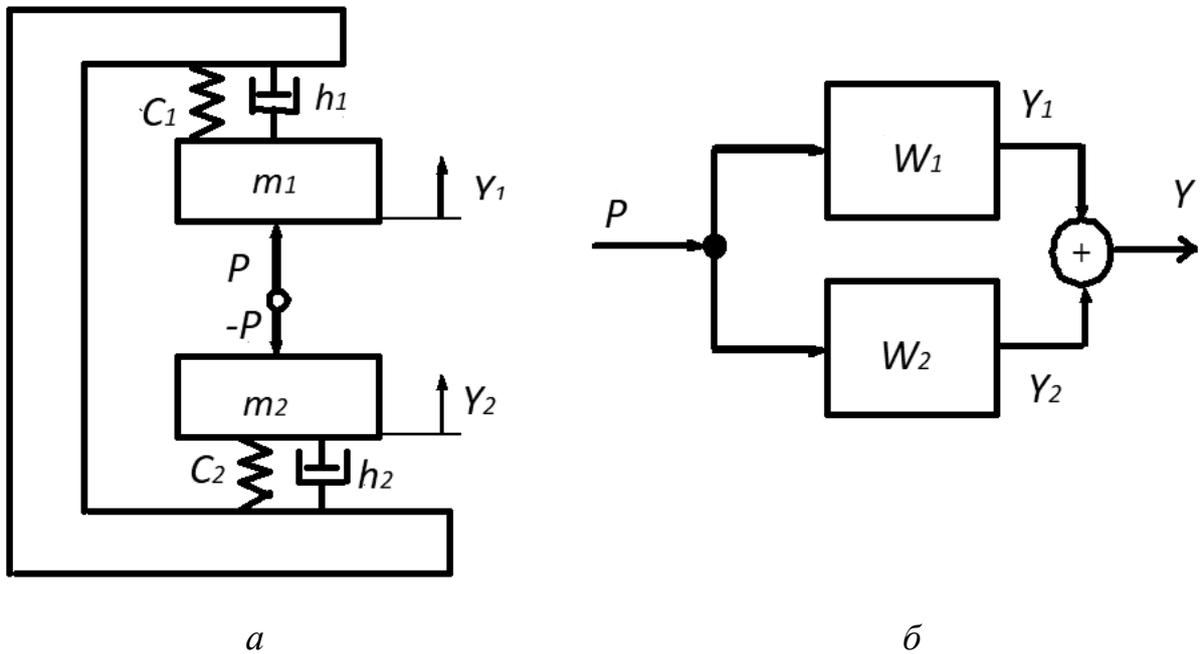


Рис. 3.3. Модели упругой системы

Передаточная функция УС W_{yc} в этом случае определяется суммой передаточных функций входящих в нее и соединенных параллельно колебательных звеньев – «шпиндельный узел» W_1 и «стол» W_2 (рис. 3.3, б)

$$W_{yc}(p) = W_1(p) + W_2(p),$$

где $W_1(p)$ и $W_2(p)$ имеют типовое математическое описание

$$W_1(p) = \frac{K_{yc1}}{T_1^2 p^2 + 2T_1 D_1 p + 1};$$

$$W_2(p) = \frac{K_{yc2}}{T_2^2 p^2 + 2T_2 D_2 p + 1}.$$

В этих выражениях значения коэффициентов определяются упруго-инерционными параметрами УС для шпиндельного узла (индекс 1) и стола (индекс 2) соответственно:

податливость элемента

$$K_{yc} = 1 / C ;$$

постоянная времени

$$T = \sqrt{m / C} ;$$

декремент колебаний

$$D = h / 2\sqrt{mC} ,$$

где C – жесткость элемента и стыков, $H / \text{мм}$;

m – приведенная масса элемента, кг;

h – приведенный коэффициент демпфирования, кг/с;

Процесс резания (рис. 3.4, а) представляет собой инерционное звено, передаточная функция которого описывается выражением

$$W_p(p) = \frac{K_p}{T_p p + 1} ,$$

где K_p – коэффициент резания, $H / \text{мм}$;

T_p – постоянная времени стружкообразования, с.

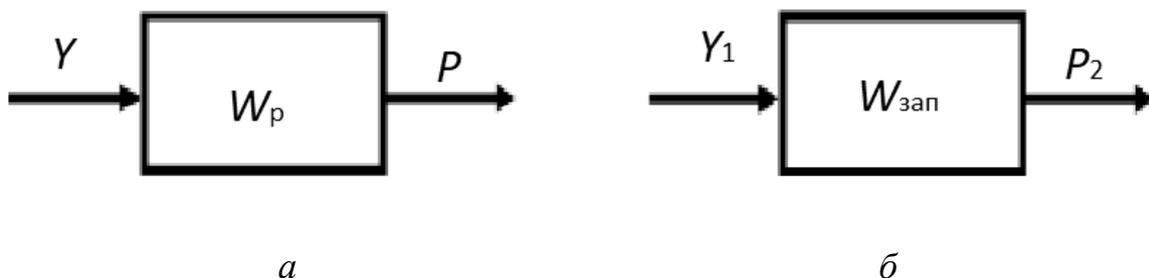


Рис. 3.4. Динамические элементы модели системы

Для конкретного инструмента и обрабатываемого материала коэффициент резания прямо пропорционален временному сопротивлению обрабатываемого материала σ_e , коэффициенту усадки стружки ξ и ширине срезаемого слоя b

$$K_p = (1,3 \dots 1,5) \sigma_e \xi b$$

Постоянная времени стружкообразования выражается зависимостью

$$T_p = (3,5 \dots 4,0) \frac{a \xi \cdot 60}{V \cdot 10^3},$$

где a – толщина срезаемого слоя, мм;

V – скорость резания, м/мин.

Скорость резания определяется известным выражением

$$V = \frac{3,14 d n}{1000},$$

где d – диаметр обработки, мм;

n – частота вращения шпинделя, об/мин.

Звено запаздывания (рис. 3.4, б) имеет передаточную функцию

$$W_{\text{зап}}(p) = e^{-\tau p}.$$

Масштабный коэффициент передачи (коэффициент усиления) W равен единице, время запаздывания τ (с) определяется выражением

$$\tau = \frac{60}{n z},$$

где n – частота вращения шпинделя, 1/мин;

z – число режущих кромок инструмента.

Варианты исходных данных для определения виброустойчивости станка приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Варианты исходных данных для расчетов

№ вар.	m_1	h_1	C_1 $\times 10^6$	m_2	h_2	C_2 $\times 10^6$	n	z	a	b	d	σ_e	ξ
1	80	320	0,2	60	460	1,0	1000	2	0,3	11	20	650	2,0
2	80	320	0,2	30	300	1,0	630	2	0,2	11	20	820	1,8
3	60	200	0,1	60	460	1,0	1000	2	0,2	9	15	730	1,6
4	60	200	0,2	40	200	0,5	800	2	0,1	9	15	560	2,2
5	40	320	0,2	40	300	2,0	1500	2	0,1	6	10	730	1,6
6	40	200	0,1	20	400	2,0	1000	2	0,1	6	10	900	1,8
7	120	400	0,2	60	460	1,0	800	2	0,2	15	25	650	2,0
8	120	460	0,1	80	300	0,5	400	2	0,3	15	25	900	1,6

Размерности параметров: масса m – кг; коэффициент демпфирования h – кг/с; жесткость C – Н/м; частота вращения шпинделя n – 1/мин; число режущих кромок инструмента z – безразмерная величина; толщина срезаемого слоя a – мм; ширина срезаемого слоя b – мм; диаметр обработки d – мм; временное сопротивление σ_e – МПа; коэффициент усадки стружки ξ – безразмерная величина.

При выполнении работы виброустойчивость станка определяется для различных значений исходных данных. Варьируемые параметры и пределы изменения их значений определяются преподавателем в каждом конкретном случае.

3.4. Определение виброустойчивости станка

Анализ виброустойчивости станка производится отдельно для различных видов обработки: «по чистому» и «по следу» с использованием соответствующей динамической модели. Для оценки устойчивости удобно пользоваться частотным критерием Михайлова–Найквиста, который позволяет по амплитудно-фазовой частотной характеристике условно разомкнутой системы (размыкание производится по главной обратной связи) судить об устойчивости замкнутой системы. Если указанная характеристика не

охватывает на комплексной плоскости точку $(-1; j0)$ – система устойчива (рис. 3.5, *a*), если охватывает – неустойчива (рис. 3.5, *б*).

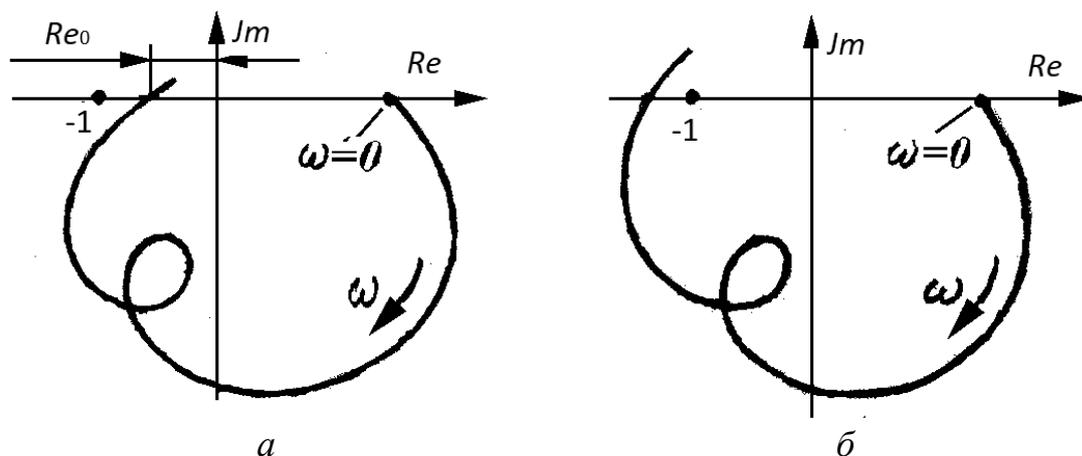


Рис. 3.5. АФЧХ разомкнутой системы:
a – устойчивой; *б* – неустойчивой

Запас устойчивости динамической системы может быть определен по амплитуде и по фазе. С точки зрения процесса обработки запас устойчивости по амплитуде показывает, во сколько раз можно увеличить сечение срезаемого слоя (изменением глубины резания или подачи) при сохранении виброустойчивости станка. Запас по фазе определяет пропорциональность изменения частоты вращения шпинделя в пределах устойчивого поведения станка. В связи с тем, что изменение частоты вращения шпинделя приводит к изменению скорости резания, предусмотренной нормативными режимами, обычно определяют только запас устойчивости по амплитуде. Для его определения на амплитудно-фазовой частотной характеристике разомкнутой системы измеряют величину отрезка Re_o , отсекаемого годографом на отрицательной части вещественной оси (рис. 3.5, *a*). Коэффициент запаса устойчивости по амплитуде представляет собой обратную величину значения этого отрезка

$$K_A = \frac{1}{Re_o}.$$

Передаточная функция условно разомкнутой системы при обработке детали «по чистому» (без звена запаздывания) определяется выражением

$$W_{\text{РАЗ}}(p) = W_{\text{УС}}(p) \cdot WP(p);$$

при обработке «по следу» (с учетом звена запаздывания) –

$$W_{\text{РАЗ}}(p) = \frac{W_{\text{УС}}(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{\text{ЗАП}}(p)}{1 + W_{\text{УС}}(p) \cdot W_p(p)}.$$

По результатам исследования необходимо сделать выводы о виброустойчивости станка для различных значений параметров и о степени влияния этих параметров. Параметры, влияние которых на виброустойчивость станка следует определить, назначаются преподавателем.

3.5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными понятиями о динамической системе станка и его виброустойчивости.
2. Ознакомиться со структурой и математическим описанием элементов динамической системы станка.
3. Составить динамические модели станка на ЭВМ для двух случаев обработки детали: «по чистому» и «по следу»; установить параметры моделей для заданного варианта исходных данных.
4. Определить амплитудно-фазовые частотные характеристики условно разомкнутых систем и оценить виброустойчивость станка для указанных случаев обработки.
5. Изменяя значения упруго-инерционных параметров УС, режимов ПР и частоту вращения шпинделя установить степень их влияния на виброустойчивость станка.
6. По результатам исследования сделать выводы по работе.

3.6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчетная модель упругой системы станка.
3. Структурные схемы динамических моделей при обработке детали «по чистому» и «по следу».
4. Математические выражения передаточных функций звеньев динамических моделей станка.
5. Исходные данные для установки параметров моделей.
6. Графики амплитудно-фазовых частотных характеристик условно разомкнутых систем; анализ виброустойчивости станка.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие о виброустойчивости станка, поясните суть динамических явлений при обработке «по чистому» и «по следу».
2. Назовите элементы динамической системы станка при обработке «по чистому» и «по следу», их взаимодействие друг с другом.
3. Поясните методику оценки виброустойчивости станка с помощью критерия Михайлова-Найквиста.
4. Как влияют упруго-инерционные параметры упругой системы, режимы резания и частота вращения шпинделя на виброустойчивость станка?

Список литературы

Дурко Е.М., Фецак С.И., Идрисова Ю.В. Динамика станков: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2014. 130 с.