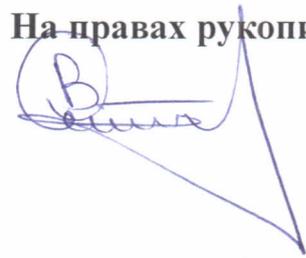


На правах рукописи



ВИТВИНОВ МАКСИМ КОНСТАНТИНОВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ
НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ПРИМЕРЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ И ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ**

**Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Новосибирск - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хоменко Валерий Андреевич

Официальные оппоненты: Попов Андрей Юрьевич,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»

Дубов Георгий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», доцент кафедры «Технология машиностроения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита диссертации состоится 26 марта 2015 г. в 14.⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.07 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20 (I- конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=14961

Автореферат разослан « 04 » февраля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Никитин Юрий Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Аналитический обзор литературных данных показывает, что основными операциями обработки наружных поверхностей деталей являются точение, фрезерование и абразивная обработка. Полученные с использованием указанных методов обработки детали находят свое применение в различных узлах и агрегатах механизмов и машин.

Волнистость поверхности, в отличие от ее шероховатости, в значительной степени формируется за счет технологического наследования. Обычно этот процесс математически описывается с помощью коэффициентов уточнения. Однако связь этих коэффициентов с параметрами операций технологического процесса (режимами резания, характеристиками инструмента, оборудования и т.п.) недостаточно изучена. Кроме того, практически не исследована взаимосвязь высотных и шаговых параметров волнистости исходной поверхности с аналогичными параметрами поверхности детали.

В связи с этим получение зависимостей, отражающих взаимосвязь волнистости исходной поверхности с волнистостью поверхности детали, позволяющих производить управление явлением технологического наследования волнистости при проектировании операций механической обработки, является актуальным направлением исследований.

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на явное влияние волнистости на эксплуатационные свойства детали, для ее параметрической оценки не существует утвержденных российских стандартов, что при проектировании изделия затрудняет возможность формирования требований к высотным и шаговым параметрам волнистости на обработанной поверхности детали. В связи с этим обычно для нормирования волнистости используют те же параметры, что и при нормировании параметров шероховатости.

Волнистость поверхности при механической обработке, с одной стороны, определяется процессами снятия стружки, вибрациями на текущей операции, а с другой – наследуется в соответствии с параметрами волнистости заготовки. Если формирование волнистости на текущей операции достаточно хорошо исследовано как в теоретическом, так и в практическом плане, то вопросы технологического наследования волнистости изучены явно недостаточно.

Целью диссертационной работы является управление технологическим наследованием волнистости поверхности детали на операциях механической обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Установить взаимосвязь между эксплуатационными свойствами поверхности детали и ее волнистостью.
2. Создать методику получения передаточных функций операций механической обработки в части установления взаимосвязи волнистости исходной по-

верхности с волнистостью поверхности детали на базе теории технологического наследования.

3. На основе экспериментальных исследований получить аналитические зависимости, описывающие формирование волнистости на операциях фрезерования и плоского шлифования при изменении параметров режима резания.

4. Разработать методику проектирования операций механической обработки с позиции управления волнистостью обработанной поверхности и внедрить ее в производство.

Научная новизна

1. Предложен способ описания технологического наследования волнистости на операциях механической обработки с помощью аппарата передаточных функций.

2. Разработана методика определения вида и коэффициентов передаточной функции операции механической обработки с помощью ее частотных характеристик.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Получены передаточные функции операций фрезерования и плоского шлифования, позволяющие прогнозировать волнистость обработанной поверхности в зависимости от параметров волнистости заготовки.

2. Создан алгоритм проектирования операции механической обработки по критерию обеспечения заданной волнистости поверхности детали.

3. Разработана автоматизированная система определения параметров шероховатости и волнистости обработанной поверхности (патент на полезную модель № 140184).

Методология и методы исследования

Теоретические исследования, приведенные в диссертации, базируются на научных основах технологии машиностроения, теории резания, математической статистики, системного анализа и цифровой обработки сигналов.

Экспериментальные результаты получены с использованием соответствующих методов исследования на современном аналитическом оборудовании, в частности исследованием рельефа поверхности детали на автоматизированном комплексе, включающем в себя профилометр HOMMEL TESTER W55, реализующим современные технологии измерения параметров шероховатости и волнистости поверхности.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследований по прогнозированию волнистости поверхности детали в зависимости от волнистости заготовки и параметров режима резания на операции фрезерования посредством построения передаточной функции операции.

2. Результаты исследований по формированию требований к исходной поверхности, исключающих проявления волнистости на поверхности детали в соответствии с теорией технологического наследования, посредством применения передаточной функции операции фрезерования.

3. Результаты исследований по получению передаточной функции операции плоского шлифования с учетом принципа технологического наследования.

4. Технологические рекомендации по использованию передаточных функций операций фрезерования и плоского шлифования при экспресс-аттестации металлорежущего оборудования или отдельных компонентов технологической системы.

Личный вклад автора

1. Разработка методики идентификации операции механической обработки с помощью аппарата передаточных функций, математически описывающей механизм технологического наследования волнистости обработанной поверхности.
2. Получение передаточных функций операций фрезерования и плоского шлифования, позволяющих автоматизировать прогнозирование волнистости обработанной поверхности.
3. Создание методик проектирования операций механической обработки с обеспечением заданной волнистости детали или заготовки.
4. Разработка общего подхода аттестации технологических систем.

Степень достоверности и апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на совместных научных семинарах кафедр «Технология автоматизированных производств» и «Общая технология машиностроения» АлтГТУ им. И.И. Ползунова в 2010–2014 гг., на 8-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Барнаул, 2011 г.), 2-й Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Кемерово 2011), 3-й Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Барнаул, 2012 г.), 9-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Барнаул, 2012 г.), 7-й Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в промышленности» (г. Минск, Республика Беларусь, 2012 г.), 4-й Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, 2013 г.), 1-й Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (г. Новосибирск, 2014 г.)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 1 патент, 3 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы из 122 наименований, приложения. Общий объем - 118 страниц машинописного текста, включая 55 рисунков, 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика области исследования и обоснована актуальность диссертационной работы. Сформулирована цель

и определены задачи исследования. Отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе «Формирование волнистости обработанной поверхности при механической обработке» приведен обзор литературных источников по теме диссертации, в котором рассмотрены вопросы формирования волнистости поверхности обработанной детали. Проанализировано влияние волнистости обработанной поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин. Выполнен анализ технологических факторов, определяющих волнистость на обработанной поверхности детали на операциях механической обработки резанием. Обозначены проблемы в оценке параметрических характеристик волнистости на обработанной поверхности путем применения математического описания операции механической обработки резанием с помощью аппарата передаточной функции. Отмечено, что значительный вклад в изучение волнистости внесли Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, А.М. Дальский, П.И. Ящерицын, Ю.К. Новоселов, П.Е. Дьяченко, Ю.Р. Виттенберг, И.В. Дунин-Барковский, И.Н. Ильин, В.А. Николаев, В.С. Комбалов, В.С. Корсаков, А.Г. Косилова и др.

Во второй главе «Моделирование явления технологического наследования волнистости» изложен метод построения передаточной функции операции механической обработки резанием, базирующийся на принципе технологического наследования, являющегося базовым в технологии машиностроения.

Оригинальность метода заключается в применении передаточных функций и частотных характеристик операций механической обработки, позволяющих прогнозировать волнистость обработанной детали в зависимости от волнистости заготовки.

На рисунке 1 представлена операция механической обработки в виде технологической системы, преобразующей профиль заготовки в профиль детали.



Рисунок 1 – Технологическая операция как система для преобразования исходного профиля заготовки в профиль детали

Для математического описания таких систем широко используется аппарат передаточных функций:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{a_k s^k + a_{k-1} s^{k-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}, \quad (1)$$

где $X(s)$, $Y(s)$ – соответственно лапласовы изображения исходного профиля и профиля детали.

Коэффициенты a_i , b_i и значения k и n определяют вид преобразования профилей и зависят от характера операции, режима резания и параметров технологической системы.

Сама передаточная функция является математическим описанием (моделью) операции механической обработки, и ее вид определяет свойства технологической системы в плане преобразования профиля заготовки в профиль детали. Кроме этого, операции могут быть присущи и собственные составляющие профиля. Так, при фрезеровании профиль детали для конкретной технологической системы определяется не только профилем заготовки, но и самим характером резания: отдельные зубья фрезы формируют профиль поверхности детали даже при идеально гладкой поверхности заготовки. Кроме того, на профиль детали влияют вынужденные колебания и автоколебания в технологической системе, которые только частично связаны с профилем заготовки. Обычно считается, что данная составляющая имеет аддитивный характер. В соответствии с этим структурная схема операции механической обработки может быть представлена в виде, приведенном на рисунке 2.

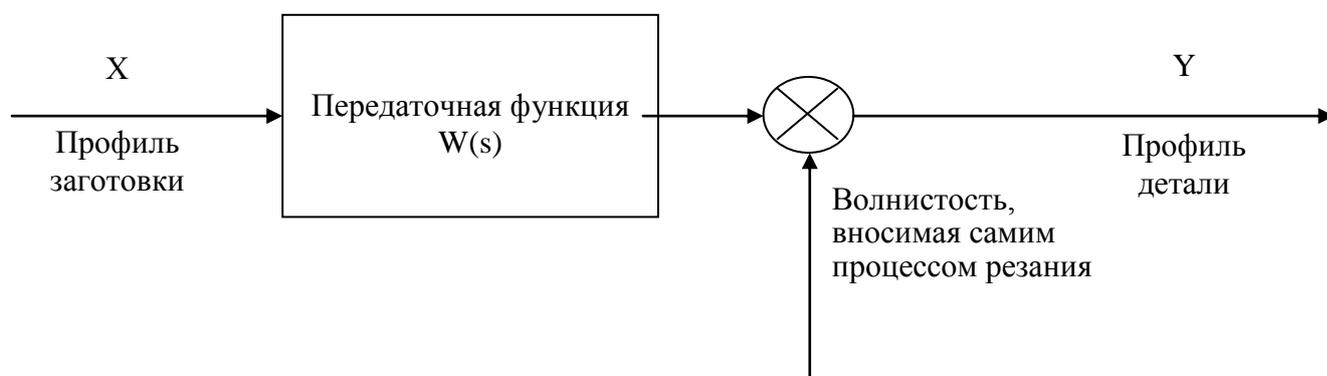


Рисунок 2 – Структурная схема операции механической обработки

Составляющие волнистости, вносимые самим процессом обработки, достаточно хорошо исследованы, и модели для их расчета подробно описаны в литературе. Поэтому в данной работе основное внимание уделяется именно процессу технологического наследования, определяемому передаточной функцией операции механической обработки.

Задача идентификации операции механической обработки включает в себя два этапа:

- 1) определение вида передаточной функции: определение порядка полинома числителя k и знаменателя n в выражении (1);
- 2) определение параметров – коэффициентов передаточной функции.

Одним из способов определения вида передаточной функции является использование логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ). Это связано с тем, что существует однозначное соответствие между набором простейших звеньев САР и видом асимптотической ЛАЧХ.

Для сокращения объема и трудоемкости проводимых экспериментов при получении ЛАЧХ предлагается использовать принцип суперпозиции. В соответствии с этим принципом, если на вход системы подается линейная комбинация элементарных сигналов $x = \sum_i x_i$, на ее выходе также получается линейная

комбинация сигналов $y = \sum_i y_i$, каждый из которых (y_i) является реакцией на элементарный входной сигнал x_i .

В общем случае профиль любой периодической поверхности при разложении в ряд Фурье имеет вид:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos\left(\frac{k\pi x}{l}\right) + b_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \right], \quad (2)$$

где a_k, b_k – коэффициенты разложения; l – полупериод функции

$$a_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l y(x) \cos\left(\frac{k\pi x}{l}\right) dx, \quad (3)$$

$$b_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l y(x) \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) dx. \quad (4)$$

Поэтому предлагается создать профиль специальной (эталонной) заготовки, включающий в себя сумму большого количества гармоник, и обработать ее. В соответствии с принципом технологического наследования после обработки деталь будет содержать также большое количество гармоник волнистости. После обработки из полученного профиля детали выделяются гармоники волнистости с частотами, соответствующими частотам исходного профиля. Отношение амплитуд гармоник детали к амплитудам гармоник заготовки дает амплитудно-частотную характеристику, по которой логарифмированием получается ЛАЧХ. В качестве исходного профиля заготовки предлагается использовать профиль прямоугольной (рисунок 3) или треугольной (рисунок 4) формы.

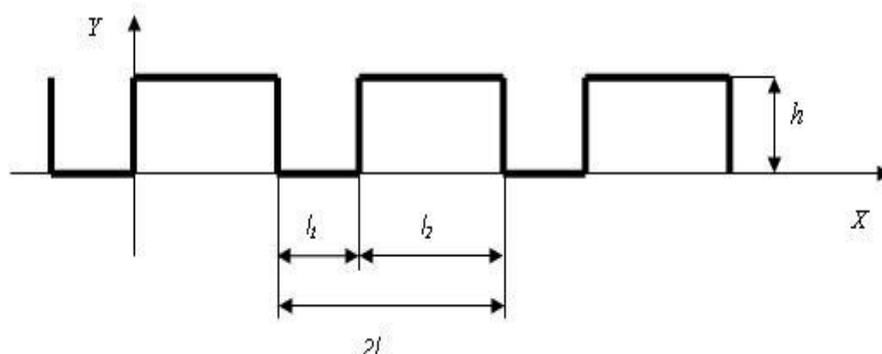


Рисунок 3 – Исходный профиль заготовки прямоугольной формы

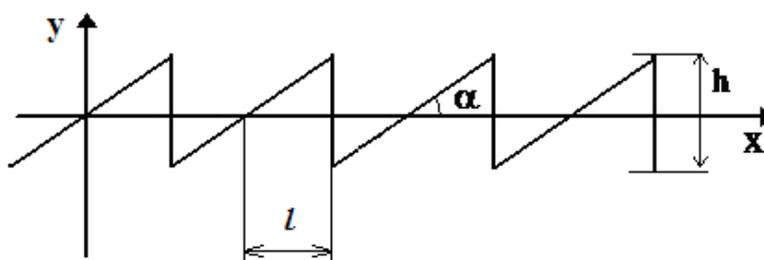


Рисунок 4 – Исходный профиль заготовки треугольной формы

При $l_1 = l_2 = l$ (частный случай) разложение исходного профиля (рисунок 3) в ряд Фурье будет иметь вид:

$$y(x) = \frac{h}{2} + \frac{2h}{\pi} \left(\sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi x}{l}\right) + \dots \right). \quad (5)$$

В общем случае при $l_1 \neq l_2$ разложение исходного профиля прямоугольной формы производится по выражениям (2)–(4).

Разложение исходного профиля треугольной формы (рисунок 4) будет иметь вид:

$$a_k = 0; \quad b_k = 2 \frac{ul}{k\pi} (-1)^{k+1} = \frac{h}{k\pi} (-1)^{k+1}. \quad (6)$$

$$y(x) = \frac{h}{\pi} \left(\sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right) \dots \right). \quad (7)$$

На рисунке 5 представлен спектр исходного профиля заготовки, выполненного в виде прямоугольного профиля. При прочих равных условиях треугольный профиль содержит большее количество гармоник, но его практическое получение является более трудоемким.



Рисунок 5 – Спектр прямоугольного профиля заготовки

Расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) операции механической обработки производится путем деления амплитуд гармоник детали на соответствующие амплитуды гармоник заготовки.

$$A(\omega_k) = \frac{A_k^{дет}}{A_k^{заг}}, \quad (8)$$

где $\omega_k = \frac{k\pi}{l}$, $k = 1, 3, 5, 7, \dots$

Далее в логарифмическом масштабе строится логарифмическая амплитудно-частотная характеристика: зависимость $20 \lg A$ от $\lg \omega$. По построенной кривой проводится асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика – ломаная линия с углами наклона, кратными ± 20 дБ/дек., а по этой ломаной восстанавливается вид передаточной функции. Уточнение коэффициентов передаточной функции осуществляется в соответствии с методом наименьших квадратов (МНК) минимизацией суммы квадратов отклонений расчетной амплитудно-частотной характеристики от экспериментальной, полученной по выражению (8). Результатом являются передаточная функция операции механической обработки и ее частотные характеристики (амплитудно-частотная и фазочастотная), позволяющие прогнозировать волнистость обработанной поверхности детали в зависимости от волнистости поверхности заготовки.

На рисунке 6 приведен укрупненный алгоритм получения передаточной функции операции механической обработки в соответствии с описанной выше методикой.

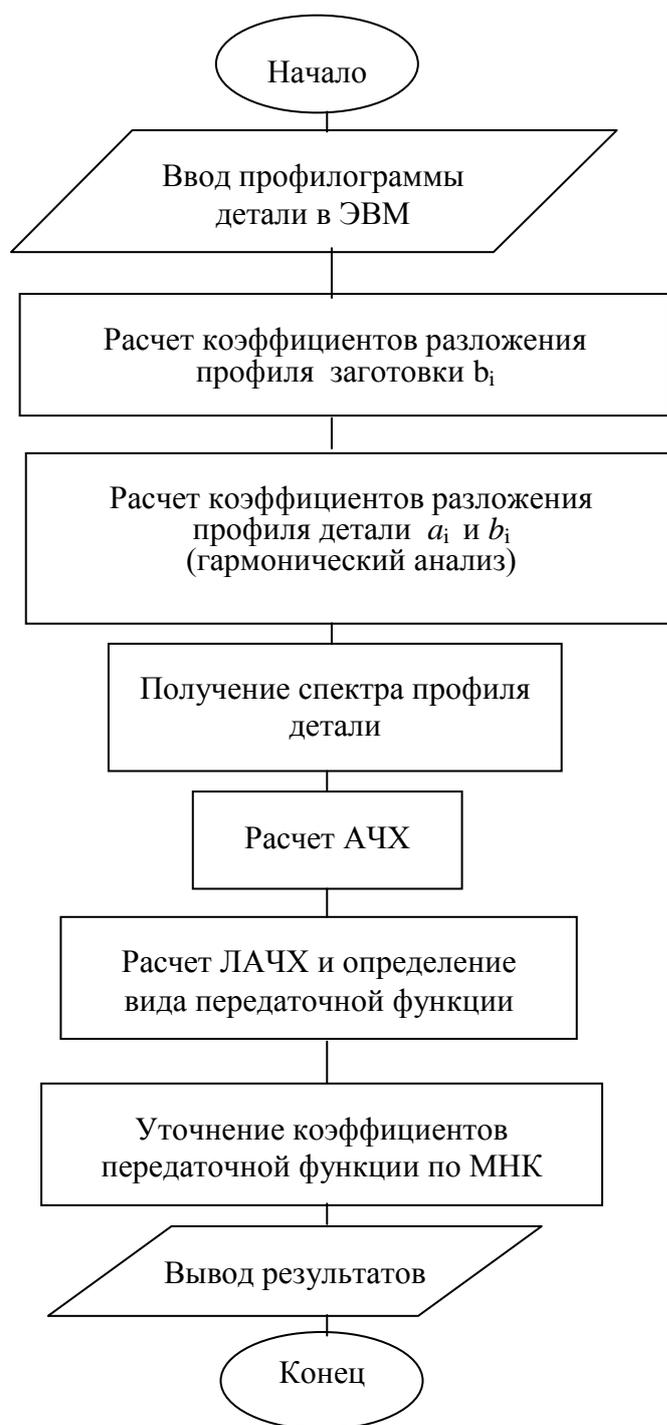


Рисунок 6 – Алгоритм построения передаточной функции операции механической обработки

В третьей главе «Экспериментальная проверка методики получения передаточных функций операции» разработанная методика получения передаточной функции операции механической обработки применяется для операций фрезерования и плоского шлифования.

Все эксперименты проводились с использованием автоматизированной системы для исследования волнистости обработанной поверхности, на конструкцию которой получен патент на полезную модель № 140184. Разработанная автоматизированная система (рисунок 7) позволяет не только сократить время для получения профилей обработанных поверхностей, но и распараллеливать обработку этих профилей за счет использования компьютерной сети.

В соответствии с алгоритмом (рисунок 6) для построения передаточной функции операции фрезерования цилиндрической фрезой был подготовлен образец – эталонная заготовка, представленная на рисунке 8.

Характеристики эталонной заготовки:

1. Профиль – пазы прямоугольной формы 10 x 10 x 1 мм;
2. Размеры бруска – 120 x 20 x 20 мм;
3. Материал – Ст40 в состоянии поставки;
4. Математическое описание профиля – выражение (5).

Обработка эталонной заготовки производилась на горизонтально-фрезерном станке, модель 6М83. В качестве инструмента применялась консольно-закрепленная фреза дисковая 100 x 10 Н9 Р6М5. В ходе проведения эксперимента изменяли параметры режима резания: глубины резания, подачи и частоты вращения фрезы.

Эксперименты по установлению зависимости коэффициентов передаточной функции от параметров режима резания проводили в соответствии с методикой дробного факторного эксперимента ДФЭ 2^{3-1} . Повторяемость эксперимента $M = 3$. В каждом эксперименте обрабатывали три образца с пазами. План эксперимента приведен в таблице 1.

Профиль обработанной поверхности разлагали в ряд Фурье и рассчитывали кривые амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) операции. На рисунке 9 приведен пример АЧХ для эксперимента из таблицы 1.

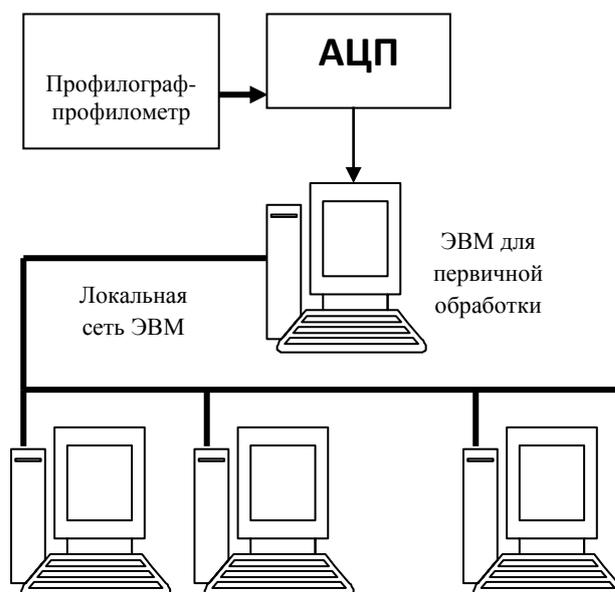


Рисунок 7 – Структурная схема автоматизированного станда



Рисунок 8 – Внешний вид эталонной заготовки

Таблица 1 – План дробного факторного эксперимента ДФЭ 2^{3-1}

N	t , мм	S , мм/мин	n , об/мин
1	2	160	100
2	2	80	80
3	1,1	160	80
4	1,1	80	100

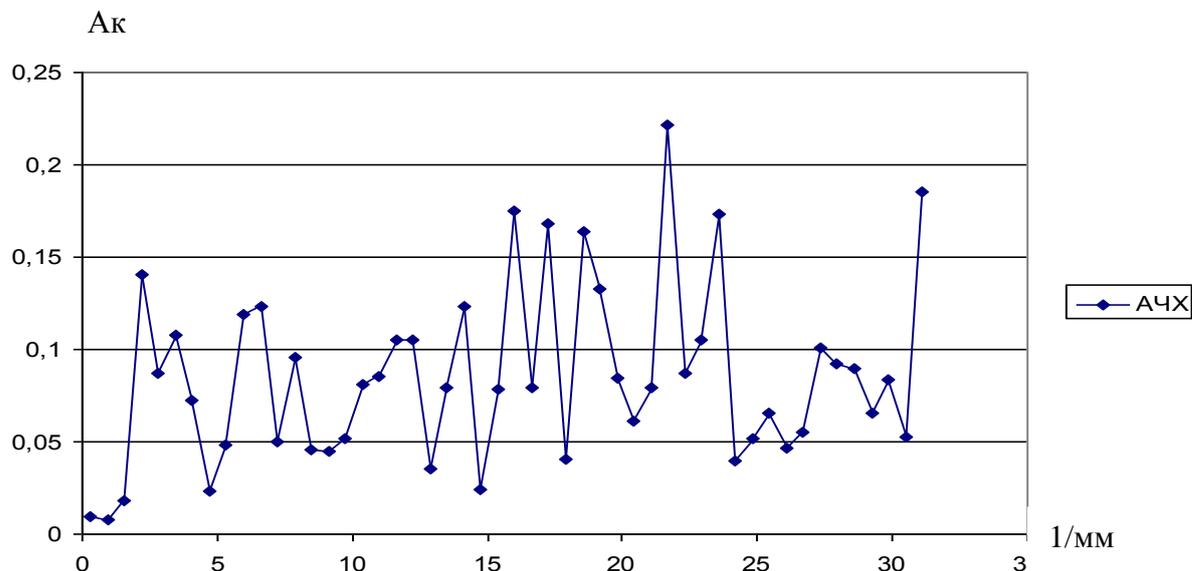


Рисунок 9 – Пример АЧХ операции фрезерования цилиндрической фрезой (эксперимент №2)

На рисунке 10 приведен пример получения ЛАЧХ операции фрезерования для выполненного ДФЭ. Более жирной линией проведена средняя ЛАЧХ с учетом повторяемости.

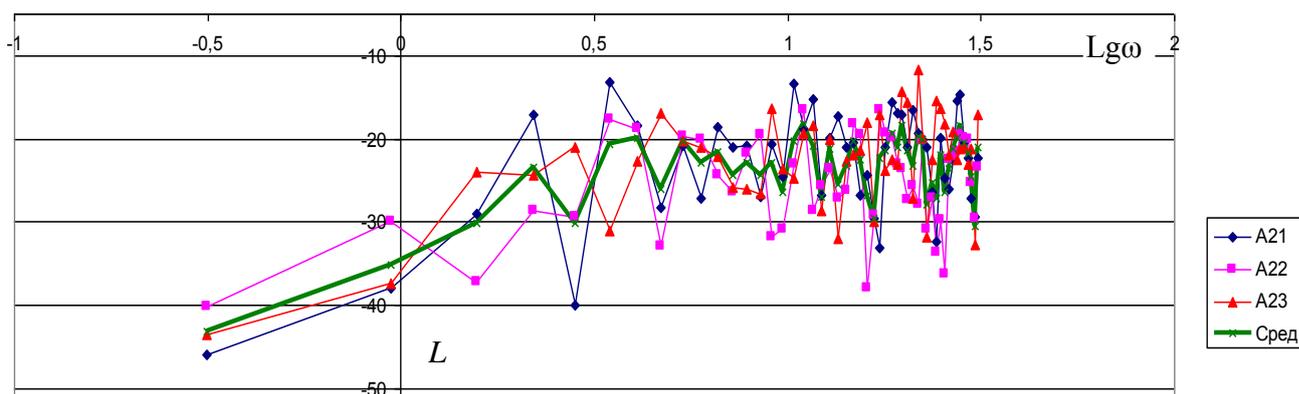


Рисунок 10 – ЛАЧХ операции фрезерования цилиндрической фрезой (таблица №1, пункт №2)

По виду ЛАЧХ (рисунок 10) для математического описания операции предложена передаточная функция вида:

$$W(s) = \frac{ks(T_2^2s^2 + 2e_2T_2s + 1)}{(T_1s + 1)(T_3^2s^2 + 2e_3T_3s + 1)} = \frac{k}{T_1s + 1} \times (T_2^2s^2 + 2e_2T_2s + 1) \times \frac{1}{T_3^2s^2 + 2e_3T_3s + 1} \times s = \quad (9)$$

$$= W_1 \times W_2 \times W_3 \times s.$$

При этом задача получения передаточной функции всей операции в каждом эксперименте сводится к нахождению следующих шести параметров: k , T_1 , T_2 , e_2 , T_3 , e_3 , с помощью метода наименьших квадратов (МНК) по кривым ЛАЧХ (рисунок 10).

В таблице 2 представлены значения коэффициентов для каждого эксперимента, полученные аппроксимацией, проводимой в среде табличного процессора Excel с использованием надстройки «Поиск решения».

Таблица 2 – Результаты аппроксимации ЛАЧХ

N	k	T_1	T_2	e_2	T_3	e_3
1	0,007049	0,175413	0,680031	1,34379	0,504928	0,414135
2	0,021978	0,372487	0,623856	0,2	0,558926	0,15
3	0,023804	0,354261	0,123388	0,933527	0,105594	0,579665
4	0,025371	0,574003	0,561626	0,338284	0,430465	0,552305

На рисунке 11 показано прохождение аппроксимирующей ЛАЧХ на фоне экспериментальных.

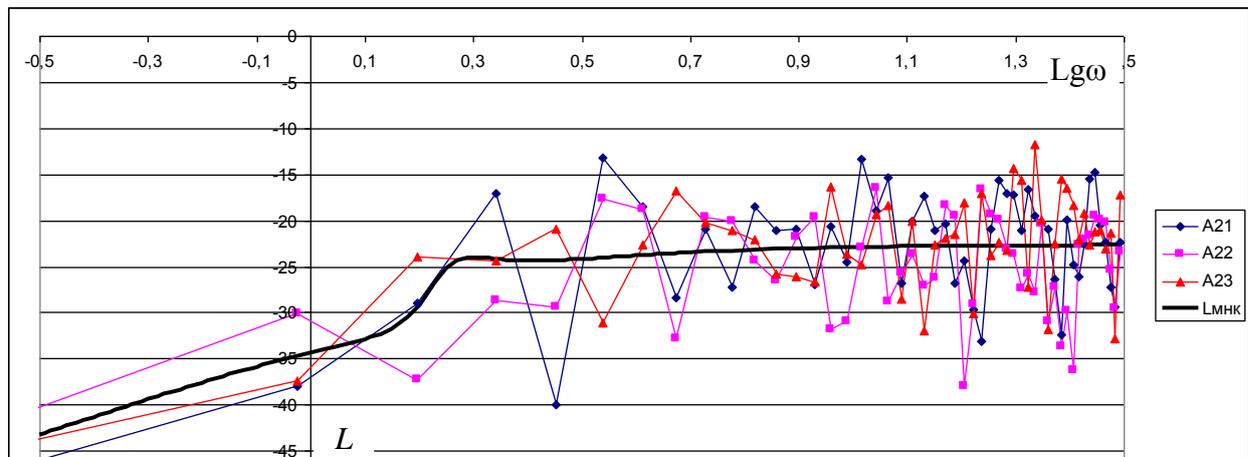


Рисунок 11 – Аппроксимация ЛАЧХ операции фрезерования цилиндрической фрезой (таблица №1, пункт №2)

Для каждого коэффициента передаточной функции исследуемой операции фрезерования в соответствии с методикой ДФЭ получены линейные зависимости от факторов t , S и n :

$$\begin{aligned} k &= 0,079778 - 0,01121 t - 0,0001 S - 0,00034 n; \\ T_1 &= 0,958583 - 0,21132 t - 0,00261 S + 0,000563 n; \\ T_2 &= -0,86117 + 0,343805 t - 0,00239 S + 0,012357 n; \\ e_2 &= -2,0685 + 0,151105 t + 0,010868 S + 0,013711 n; \\ T_3 &= -0,3794 + 0,293205 t - 0,00237 S + 0,006768 n; \\ e_3 &= 0,162067 - 0,31548 t + 0,001821 S + 0,005915 n. \end{aligned} \quad (10)$$

Проверка адекватности модели по критерию Фишера доказывает возможность использования полученных зависимостей для прогнозирования результатов фрезерования.

Аналогичным образом описанная во второй главе методика построения передаточной функции операции механической обработки резанием экспериментально проверена и для операции плоского шлифования.

В соответствии с алгоритмом (рисунок 6) для построения передаточной функции операции плоского шлифования был подготовлен образец – эталонная заготовка, аналогичная представленной на рисунке 8, профиль поверхности которой изображен на рисунке 12.

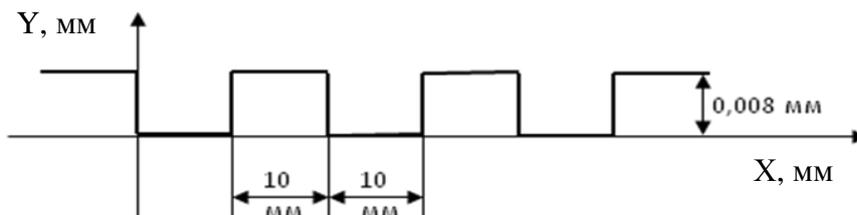


Рисунок 12 – Профиль поверхности эталонной заготовки

Характеристики эталонной заготовки:

1. Профиль – пазы прямоугольной формы;
2. Размеры бруска – 120 x 20 x 20 мм;
3. Материал – Ст40 в состоянии поставки;
4. Математическое описание профиля – выражение (5)

Оборудование: Плоскошлифовальный станок модели 3Г71.

Инструмент: шлифовальный круг 1 250*10*76 25A16СМ17К35БЗ.

Способ обработки: плоское шлифование периферией круга.

Режимы резания: Скорость вращения круга ($V_{кр}$) – 35 м/с²;

Скорость заготовки ($V_{заг}$) – 15 м/мин; Глубина резания (t) – 0,01 мм.

Обработка экспериментальных данных производилась с помощью разработанного автоматизированного стенда для исследования параметров шероховатости и волнистости поверхности детали (рисунок 7).

На рисунке 13 приведена амплитудно-частотная характеристика операции плоского шлифования, а на рисунке 15 – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика операции.

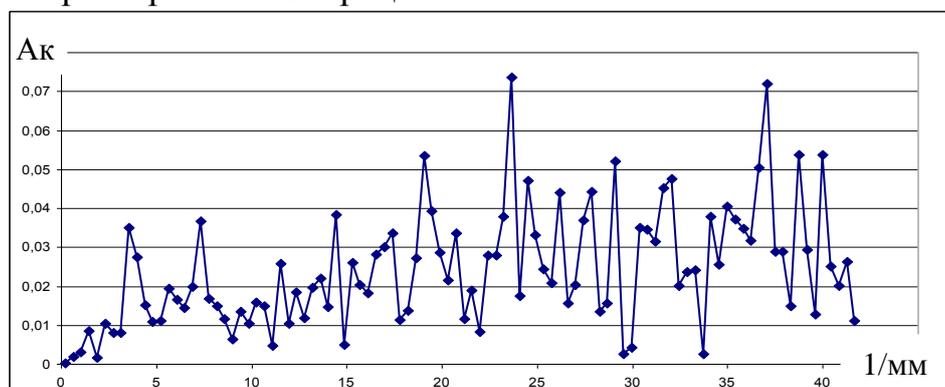


Рисунок 13 – АЧХ операции плоского шлифования

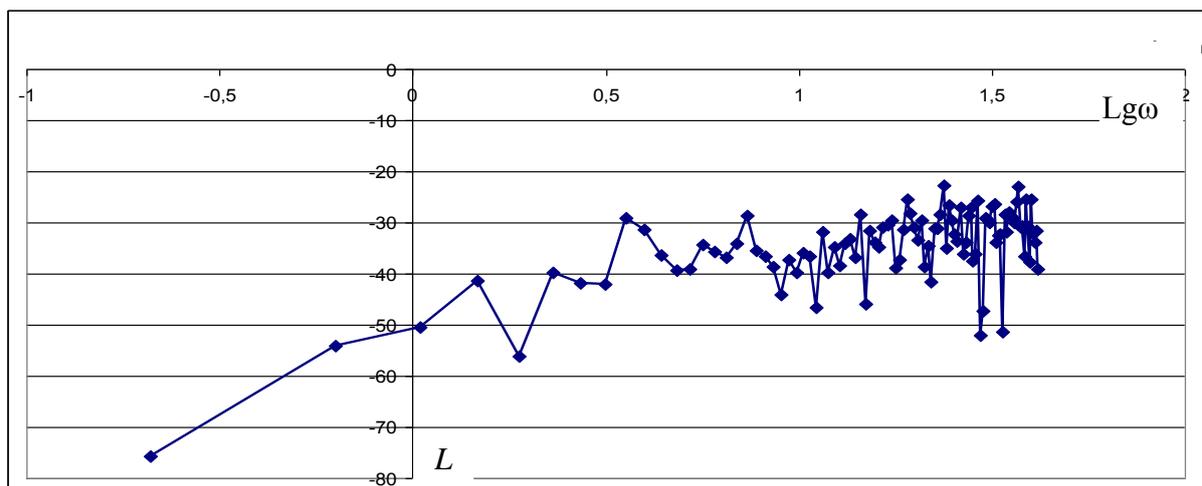


Рисунок 14 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика операции плоского шлифования

По виду ЛАЧХ (рисунок 14) для математического описания операции предложена передаточная функция вида:

$$W(s) = \frac{ks^2}{T^2s^2 + 2eTs + 1} \quad (11)$$

Аналитическое представление АЧХ операции (рисунок 13), в зависимости от вида передаточной функции будет иметь вид:

$$A(\omega) = \frac{k\omega^2}{\sqrt{(1 - T^2\omega^2)^2 + 4e^2T^2\omega^2}} \quad (12)$$

Методом наименьших квадратов (МНК) были найдены коэффициенты k , T , e выражения (11), их значения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов передаточной функции

№	1	2	3	4	Среднее	Погрешность, %
k	0,0507	0,0508	0,0522	0,0524	0,0515	3,17
T	1,2372	1,2261	1,2239	1,2505	1,2345	2,15
e	8,9104	8,9460	9,2219	8,6092	8,9219	6,87

Среднее значение погрешности для четырех экспериментов составило около 4%.

На рисунке 15 показан результат прохождения аппроксимирующей АЧХ на фоне экспериментальной.

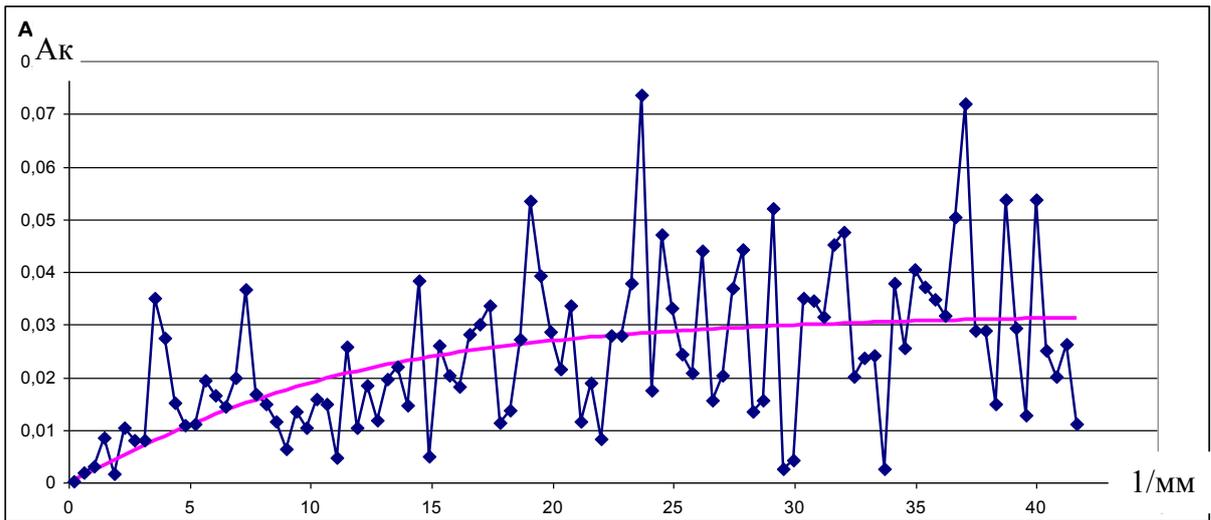


Рисунок 15 – Аппроксимация амплитудно-частотной характеристики

Анализ выражения (12) с учетом коэффициентов аппроксимации из таблицы 3 говорит о том, что с ростом частоты волнистости заготовки (или, что то же самое, снижение шага волнистости) амплитуда волнистости детали несколько увеличивается, стремясь к постоянному значению.

Таким образом, разработанная во второй главе методика позволяет не только математически описать преобразование волнистости на операциях фрезерования цилиндрической фрезой и плоского шлифования периферией круга, то есть строить математическую модель явления технологического наследования волнистости, но и прогнозировать волнистость на операции фрезерования, например, в зависимости от параметров режима резания.

В четвертой главе «Применение передаточных функций операции при проектировании технологических процессов» описано использование разработанной методики для решения технологических задач. На рисунке 16 приведена классификация задач проектирования.



Рисунок 16 – Классификация задач

Так как передаточная функция операции математически реализует технологическое наследование волнистости, то основной (прямой) задачей является прогнозирование волнистости детали при заданной волнистости заготовки. В простейшем случае амплитуда волны на заготовке $A_{ЗАГ}$ при известной ее частоте $\omega_{ЗАГ}$ преобразуется в волнистость детали в соответствии с выражением:

$$A_{ДЕТ} = A_{ЗАГ} \times A(\omega_{ЗАГ}), \quad (13)$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика, определяемая по передаточной функции операции.

Частота волнистости однозначно определяется шагом волнистости по средней линии S_W : $\omega_{ЗАГ} = \pi/S_W$.

При наличии на заготовке нескольких гармоник с различной частотой и фазой при определении амплитуды волны на детали их необходимо складывать с учетом не только амплитудно-частотной, но и фазочастотной характеристик:

$$y(x)_{ДЕТ} = \sum_{i=1}^n A(\omega_i) [A_i \sin(\omega_i x + \varphi_i + \varphi(\omega_i))], \quad (14)$$

где A_i , ω_i , φ_i – соответственно амплитуда, частота и фаза гармоники заготовки; $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ – АЧХ и ФЧХ операции.

Если фазы волн на заготовке неизвестны, то суммарную амплитуду гармоник можно приближенно определить по формуле:

$$A_{ДЕТ} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [A(\omega_i) A_i]^2}. \quad (15)$$

При решении обратной задачи – определении требований к заготовке при известных требованиях к детали – необходимо также использовать принцип технологического наследования. При этом волнистость заготовки определяется из формул (13)–(15), но обратным расчетом: амплитуды и частоты волн детали полагаются известными, и требуется определить требования к заготовке. В общем случае решение обратной задачи производится по формуле:

$$y(x)_{ЗАГ} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{A(\omega_i)} [A_{iДДЕ} \sin(\omega_i x + \varphi_{iДДЕ} - \varphi(\omega_i))]. \quad (16)$$

Очень важным направлением использования разработанного подхода является возможность его применения при аттестации и сравнении технологических систем. Например, при анализе двух технологических систем технолог получает количественный критерий, позволяющий объективно оценивать и сравнивать их свойства. На рисунке 17 показаны два варианта АЧХ технологических систем при плоском шлифовании, отличающиеся используемыми приспособлениями. Вариант 2 отличается большей жесткостью. В связи с этим уровень высокочастотных гармоник у него ниже, однако в области низких частот ($\omega \approx 0,5$ 1/мм; $S_W \approx \pi/\omega \approx 6$ мм) возможен резонанс, приводящий к возрастанию высоты волнистости.

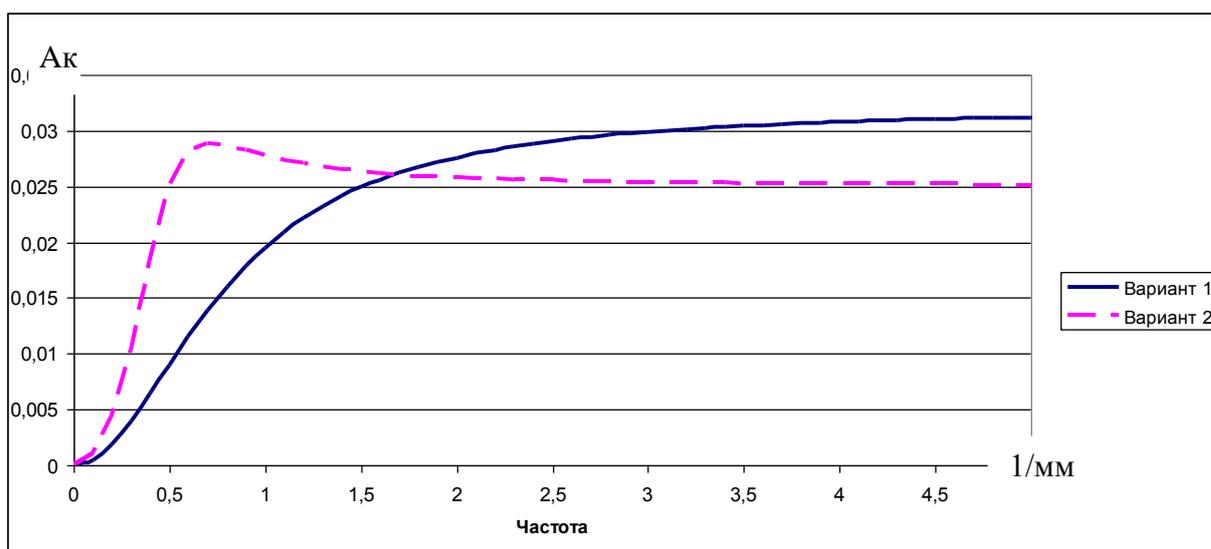


Рисунок 17 – Сравнение АЧХ технологических систем

Важным преимуществом такого подхода является сравнение не каких-либо параметров технологических систем (жесткости, массы подвижных элементов, демпфирования и т.п.), а их влияния на результаты обработки – формирование высотных и шаговых параметров волнистости. С помощью описанного подхода можно оценивать влияние на волнистость обработанной поверхности не только приспособления, но и параметров инструмента, качества ремонта оборудования и т.п.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее развитие темы исследований предполагает: разработку программных средств для идентификации технологической системы и построения всех ее видов частотных характеристик и передаточной функции в автоматическом режиме, по которым формируются объективные данные о параметрах волнистости на поверхности детали либо устанавливаются требования к волнистости на поверхности заготовки; формулирование рекомендаций к разработанному способу аттестации металлорежущего оборудования, основанного на методе построения передаточной функции операции механической обработки резанием, базирующийся на принципе технологического наследования; проверка возможного применения предложенного метода прогнозирования волнистости на обработанной поверхности для других способов обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе изложены результаты исследований прогнозирования волнистости на операции фрезерования, основанные на разработанном способе построения передаточной функции операции механической обработки резанием.

1. На основе аналитического обзора установлено, что волнистость обработанной поверхности в значительной мере определяет эксплуатационные свойства деталей машин. Наряду с процессом снятия стружки и вибрациями

технологической системы, на окончательный профиль поверхности детали влияет и волнистость исходной поверхности.

2. Разработанная методика получения передаточных функций операций механической обработки позволяет количественно охарактеризовать технологическое наследование волнистости поверхности детали.

3. Для операции фрезерования и плоского шлифования экспериментально получены передаточные функции в виде передаточных функций третьего $\frac{ks(T_2^2s^2 + 2e_2T_2s + 1)}{(T_1s + 1)(T_3^2s^2 + 2e_3T_3s + 1)}$ и второго $\frac{ks^2}{T^2s^2 + 2eTs + 1}$ порядков, позволяющие выбирать режимы резания при решении прямой и обратной задач расчета параметров волнистости.

4. Создана методика прогнозирования волнистости обработанной поверхности и проектирования операции механической обработки. Методика апробирована при фрезеровании и плоском шлифовании. При расчете параметров режима резания при фрезеровании плоскости рекомендованы конкретные значения частоты вращения фрезы и подачи для надежного обеспечения высоты волнистости 0,01 мм.

5. Методика проектирования операции фрезерования плоских поверхностей внедрена на ОАО «Барнаултрансмаш» с ожидаемым экономическим эффектом 185 000 (сто восемьдесят пять тысяч) рублей.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Пат. на полез. мод. № 140184. Российская Федерация. Автоматизированный комплекс определения параметров шероховатости и волнистости обработанной поверхности / М. К. Витвинов, С. Л. Леонов, В. А. Хоменко. Зарег. 01.04.2014, опубл. 27.04.20014, бюл. № 12.

В изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

2. Витвинов, М. К. Использование принципа технологического наследования для идентификации операции механической обработки / В. А. Хоменко, С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1/1. – С. 321–323.

3. Витвинов, М. К. Автоматизированная система определения шероховатости и волнистости обработанной поверхности / В. А. Хоменко, С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Вестник алтайской науки. – 2013. – № 2-1. – С. 36–40.

4. Витвинов, М. К. Прогнозирование волнистости на операциях механической обработки резанием с учетом технологического наследования / В. А. Хоменко, М. К. Витвинов // Ползуновский вестник. – 2014. – №4-2. – С. 126–131.

В прочих изданиях:

5. Витвинов, М. К. Методика идентификации операции плоского шлифования периферией круга / С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Горизонты образования: науч.-образ. журн. АлтГТУ. – 2011. – № 13 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/publication/5/> (Дата обращения: 10.01.2015).

6. Витвинов, М. К. Использование передаточной функции для идентификации операции плоского шлифования периферией круга / С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Инновации в машиностроении : труды 2-й Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6–8 окт. 2011 г. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2011. – С. 88–91.

7. Витвинов, М. К. Использование принципа технологического наследования для идентификации операции фрезерования / С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 135–138.

8. Витвинов, М. К. Методика построения имитационных моделей операций механической обработки / С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Горизонты образования: науч.-образ. журн. АлтГТУ. – 2012. – № 14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/publication/5/> (Дата обращения: 10.01.2015).

9. Витвинов, М. К. Идентификация операции фрезерования дисковыми фрезами / С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Информационные технологии в промышленности ИП*2012 : труды 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30–31 окт. 2012 г. – Барнаул : Изд-во ГНУ «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси», 2012. – С. 171–173.

10. Витвинов, М. К. Идентификация операции фрезерования на основе принципа технологического наследования / В. А. Хоменко, С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Инновации в машиностроении : труды 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 97–102.

11. Витвинов, М. К. Технологическое наследование волнистости при фрезеровании / А. А. Ситников, С. Л. Леонов, М. К. Витвинов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : труды 1-й Междунар. науч. конф. молод. ученых : Ч. 3. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 28–31.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 2022. Подписано в печать 22.01.2015 г.