

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.914.1

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

В.А. Хоменко, М.К. Витвинов

Предложено использовать аппарат передаточных функций для математического описания процесса преобразования профиля заготовки в профиль детали. Передаточная функция позволяет учесть как статические, так и динамические явления при механической обработке. Для ее получения используются частотные характеристики операции, которые формируются возбуждением полигармонического сигнала с помощью эталонной детали. На основе методики планирования экспериментов для операции цилиндрического фрезерования получены зависимости коэффициентов передаточной функции от параметров режима резания – глубина резания, подачи и частоты вращения фрезы. Разработанная модель позволяет прогнозировать волнистость поверхности детали при известной волнистости заготовки, а также оценивать возможность появления брака по параметрам волнистости при различных режимах резания.

Ключевые слова: технологическое наследование, фрезерование, волнистость, передаточная функция, режим резания.

Принцип технологического наследования является основополагающим в технологии машиностроения. В соответствии с этим принципом погрешности заготовки при механической обработке наследуются деталию. Обычно количественно наследование учитывается с помощью передаточных отношений [1,2]. Однако отсутствие конкретных значений этих передаточных отношений и их количественной связи с параметрами оборудования, инструмента и режима резания сдерживает применение принципа технологического наследования при проектировании операций механической обработки.

Нами предлагается подход, основанный на принципе технологического наследования и позволяющий прогнозировать волнистость обработанной детали в зависимости от волнистости заготовки. Этот подход базируется на использовании передаточных функций и частотных характеристик операций механической обработки.

Передаточные функции широко используются в теории автоматического управления для описания динамических явлений при прохождении сигнала со входа на выход системы. Например, при математическом описа-

нии упругой части технологической системы часто используется дифференциальное уравнение второго порядка:

$$m\ddot{y} + G\dot{y} + ky = P_y, \quad (1)$$

где y – упругие отжатия; m , G , k – параметры упругой системы (соответственно, масса, демпфирование и жесткость); P_y – сила резания.

Выражение (1) является математической моделью технологической системы в плане влияния силы резания P_y на величину упругих отжатий y .

Дифференциальному уравнению (1) соответствует передаточная функция:

$$W(s) = \frac{1}{ms^2 + Gs + k}. \quad (2)$$

Таким образом, передаточная функция (2) является просто другой формой записи дифференциального уравнения (1). Однако использование передаточных функций позволяет легко перейти к применению частот-

ных характеристик – амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик.

Аппарат передаточных функций можно использовать и при математическом описании операций механической обработки [3]. В соответствии с принципом технологического наследования волнистость обработанной поверхности детали определяется волнистостью поверхности заготовки: рис. 1.

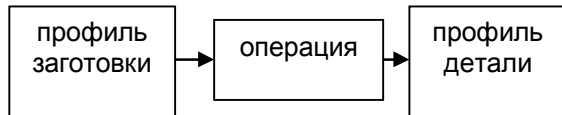


Рисунок 1 - Технологическая операция как система для преобразования исходного профиля заготовки в профиль детали

При этом передаточная функция операции имеет вид:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{a_k s^k + a_{k-1} s^{k-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}, \quad (3)$$

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

Коэффициенты a_i , b_i и значения k и n определяют вид преобразования профилей и зависят от вида операции, режима резания и параметров технологической системы. Задача идентификации технологической системы сводится к определению коэффициентов передаточной функции a_i и b_i . Сами значения коэффициентов, в отличие от передаточной функции (2.2), не имеют явного физического смысла. Важно отметить, что предлагаемый подход основан на теории технологического наследования и учитывает, как за счет технологической операции профиль (волнистость) заготовки преобразуется в профиль (волнистость) детали.

Кроме преобразования профиля заготовки в профиль детали операции могут быть присущи и собственные составляющие профиля. Так, например, 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 и автоколебания в технологической системе, которые только частично связаны с профилем заготовки. Обычно считается, что такие составляющие имеют аддитивный ха-

рактер. В соответствии с этим, структурная схема операции механической обработки может быть представлена в виде рис. 2.

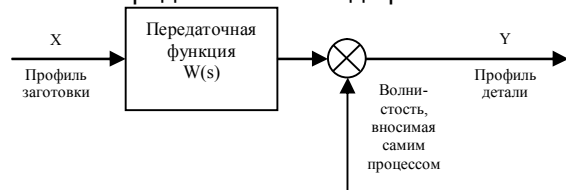


Рисунок 2 - Структурная схема операции механической обработки.

Составляющие волнистости, вносимые самим процессом обработки, достаточно хорошо исследованы и модели для их расчета подробно описаны в литературе [3,4]. Поэтому в данном исследовании основное внимание уделяется именно процессу технологического наследования, определяемому передаточной функцией операции механической обработки.

Задача идентификации операции механической обработки включает в себя два этапа:

1. 1. Определение вида передаточной функции: определение порядка полинома числителя k и знаменателя n в выражении (3).

2. 2. Определение параметров - коэффициентов передаточной функции.

Одним из наиболее эффективных способов определения вида передаточной функции является использование логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ). Это связано с тем, что существует однозначное соответствие между набором простейших звеньев САП и видом асимптотической ЛАЧХ [5,7].

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 ко-

торых (y_i) является реакцией на элементарный входной сигнал x_i .

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

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos\left(\frac{k\pi x}{l}\right) + b_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \right], \quad (4)$$

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

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

Поэтому если создать профиль специальной (эталонной) заготовки, включающий в себя сумму большого количества гармоник и обработать ее, деталь явится результатом воздействия также большого количества гармоник. Далее на выходе системы из получаемого профиля выделяются гармоники с частотой, соответствующей частотам исходного профиля. Для этого можно применять известные алгоритмы гармонического анализа. Отношение амплитуд гармоник детали к амплитудам гармоник заготовки дает амплитудно-частотную характеристику, по которой логарифмированием получается ЛАЧХ. С учетом простоты изготовления предлагается использовать прямоугольный профиль заготовки: рис. 3.

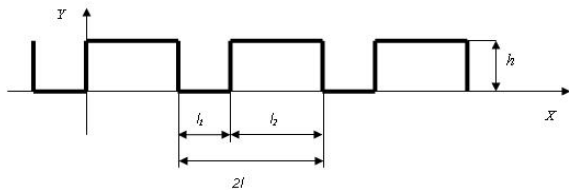


Рисунок 3 - Прямоугольный профиль поверхности эталонной заготовки

При этом разложение этого профиля в ряд Фурье принимает вид:

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

Коэффициенты разложения:

$$A_k^{заг} = b_k^{заг} = \frac{2h}{k\pi} \quad (5)$$

После механической обработки поверхности эталонной заготовки производится профилографирование поверхности полученной детали и рассчитываются коэффициенты Фурье ее профиля. Расчет значений амплитудно-частотной характеристики производится по формулам:

$$A(\omega_k) = \frac{A_k^{дем}}{A_k^{заг}}, \quad (6)$$

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

Далее в логарифмическом масштабе строится ЛАЧХ: зависимость $20 \lg A$ от $\lg \omega$. По построенной кривой проводится асимптотическая ЛАЧХ – ломаная линия с углами на-

клона, кратными ± 20 дБ/дек., а по этой ломаной восстанавливается вид передаточной функции. Уточнение коэффициентов передаточной функции осуществляется в соответствии с методом наименьших квадратов минимизацией суммы квадратов отклонений расчетной АЧХ от экспериментальной, полученной по формуле (6). Результатом является передаточная функция операции механической обработки и ее частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ), позволяющие прогнозировать волнистость обработанной поверхности детали в зависимости от волнистости поверхности заготовки.

Разработанный алгоритм идентификации опробован при получении математического описания операции цилиндрического фрезерования. При этом производилось построение передаточной функции с учетом изменения параметров режима резания – глубины резания, подачи и частоты вращения фрезы. Оборудование: горизонтально-фрезерный станок модель 6М83. Инструмент: фреза дисковая 100x10 Н9 Р6М5. Внешний вид эталонной заготовки представлен на рис. 4. Параметры прямоугольных пазов: $h = 1,0$ мм; $l_1 = l_2 = 10$ мм. Материал заготовки – сталь 40 в состоянии поставки.

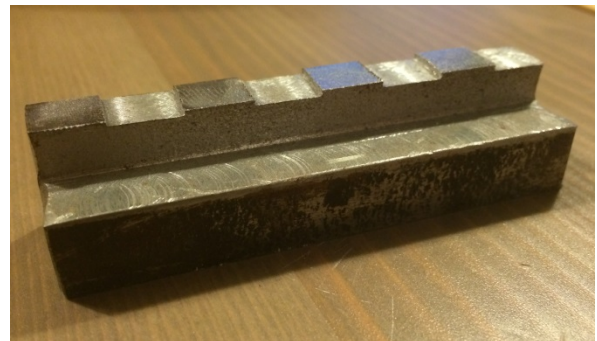


Рисунок 4 - Внешний вид эталонной заготовки

Профили обработанных поверхностей записывали на приборе HOMMEL TESTER W55 с получением файлов hwr [8]. Затем с помощью разработанного алгоритма из этих файлов получали профиль обработанной поверхности.

Эксперименты по изучению зависимости коэффициентов передаточной функции от параметров режима резания производили в соответствии с методикой дробного факторного эксперимента ДФЭ 23-1 [6]:

Таблица 1 – План эксперимента ДФЭ 23-1

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

Повторяемость эксперимента M = 3. В каждом эксперименте обрабатывали 3 образца с пазами.

На рис. 5 приведены результаты эксперимента №2 из таблицы 1. Ломаными показаны экспериментальные ЛАЧХ, а сплошной линией – результаты аппроксимации передаточной функцией

$$W(s) = \frac{ks(T_2^2s^2 + 2e_2T_2s + 1)}{(T_1s + 1)(T_3^2s^2 + 2e_3T_3s + 1)} \quad (7)$$

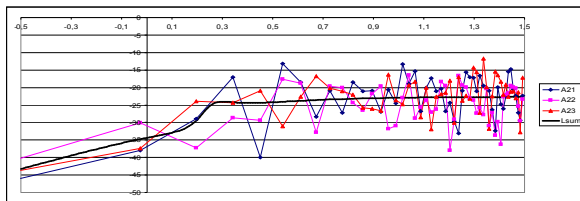


Рисунок 5 - Экспериментальные ЛАЧХ и их аппроксимация

Вид передаточной функции выбран в соответствии с видом экспериментальных ЛАЧХ. Коэффициенты рассчитаны в соответствии с методом наименьших квадратов, обеспечивая минимум расхождения экспериментальных и расчетной ЛАЧХ. В таблице 2 приведены значения коэффициентов для каждого эксперимента из таблицы 1.

Таблица 2 – Результаты аппроксимации

N	k	T1	T2	e2	T3	e3
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

Продолжение таблицы 2

N	k	T1	T2	e2	T3	e3
4	0,025371	0,574003	0,561626	0,338284	0,430465	0,552305

Для каждого коэффициента в соответствии с методикой ДФЭ получены линейные зависимости от факторов t, S и n:

$$k = 0,079778 - 0,01121 t - 0,0001 S - 0,00034 n;$$

$$T1 = 0,958583 - 0,21132 t - 0,00261S + 0,000563 n;$$

$$T2 = -0,86117 + 0,343805 t - 0,00239 S + 0,012357 n; \quad (8)$$

$$e2 = -2,0685 + 0,151105 t + 0,010868 S + 0,013711 n;$$

$$T3 = -0,3794 + 0,293205 t - 0,00237 S + 0,006768 n;$$

$$e3 = 0,162067 - 0,31548 t + 0,001821 S + 0,005915 n.$$

Полученные зависимости позволяют прогнозировать волнистость обработанной детали в зависимости от волнистости заготовки. Амплитудно-частотная характеристика определяется формулой

$$A(\omega) = \frac{k\omega}{\sqrt{1+T_1^2\omega^2}} \times \frac{\sqrt{(1-T_2^2\omega^2)^2 + 4e_2^2T_2^2\omega^2}}{\sqrt{(1-T_3^2\omega^2)^2 + 4e_3^2T_3^2\omega^2}} \quad (9)$$

Фазо-частотная характеристика рассчитывается по следующим выражениям:

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) + \varphi_3(\omega) \quad (10)$$

где

$$\varphi_1(\omega) = \text{arctg} \frac{1}{T_1\omega};$$

$$\varphi_2(\omega) = \begin{cases} \text{arctg} \frac{2e_2T_2\omega}{1-T_2^2\omega^2}, & 1-T_2^2\omega^2 > 0 \\ \pi + \text{arctg} \frac{2e_2T_2\omega}{1-T_2^2\omega^2}, & 1-T_2^2\omega^2 \leq 0 \end{cases};$$

$$\varphi_3(\omega) = \begin{cases} \text{arctg} \frac{2e_3T_3\omega}{T_3^2\omega^2 - 1}, & 1-T_3^2\omega^2 > 0 \\ \text{arctg} \frac{2e_3T_3\omega}{T_3^2\omega^2 - 1} - \pi, & 1-T_3^2\omega^2 \leq 0 \end{cases}$$

На рис. 6 приведена АЧХ фрезерной операции для t = 2 мм, S = 160 мм/мин, n = 80 об/мин. В соответствии с этой кривой до частоты $\omega = 2,1$ 1/мм амплитуда волнистости

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

детали возрастает. Этой частоте соответствует шаг волны заготовки $SW = 1/(2\pi\omega) = 0,076$ мм. При дальнейшем увеличении частоты и, соответственно, уменьшении шага амплитуда волнистости детали несколько снижается (минимум при $SW = 0,044$ мм). Затем амплитуда несколько увеличивается.

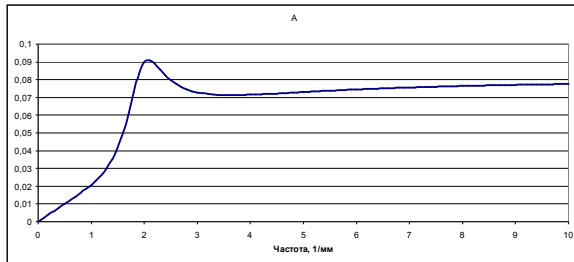


Рисунок 6 - Пример амплитудно-частотной характеристики фрезерной операции

При полигармонической волнистости сложение амплитуд необходимо производить с учетом фазочастотной характеристики (10). Если фазовые параметры волнистости заготовки неизвестны, сложение амплитуд приближенно можно производить по правилу квадратного корня. Например, при наличии на заготовке волнистости с параметрами $WZ1 = 0,7$ мм, $SW1 = 0,1$ мм и $WZ1 = 0,9$ мм, $SW1 = 0,5$ мм на детали образуются волны с амплитудой $WZ1 = 0,5 \cdot 0,049 = 0,034$ мм при $SW1 = 0,1$ мм и $WZ1 = 0,9 \cdot 0,0064 = 0,0058$ мм при $SW1 = 0,5$ мм. Суммарная волнистость

$$W_{Z\text{дое}} \approx \sqrt{0,034^2 + 0,0057^2} = 0,035 \text{ мм.}$$

Это свидетельствует о большем влиянии на волнистость детали высокочастотных составляющих волнистости заготовки, что полностью соответствует АЧХ рис. 6.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика позволяет производить идентификацию операции механической обработки с получением передаточной функции операции.

2. Полученные зависимости коэффициентов передаточной функции от параметров режима резания дают возможность прогнози-

ровать волнистость обработанной поверхности детали при цилиндрическом фрезеровании.

3. Графическое представление частотных характеристик позволяет формировать требования к заготовке для предотвращения брака по параметрам волнистости при изготовлении деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский – М.: Машиностроение, 2002. - 684 с.
- 2 Ящерицин, П. И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей / П. И. Ящерицин – Минск: Наука и техника, 1971. - 21 с.
- 3 Леонов, С. Л. Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования / С. Л. Леонов, А. Т. Зиновьев – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. - 198 с.
- 4 Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов - М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
- 5 Леонов, С.Л. Идентификация операции фрезерования на основе принципа технологического наследования / С. Л. Леонов, В.А. Хоменко, М.К. Витвинов // Труды 4-ой международной научно-практической конференции. " Инновации в машиностроении". - Новосибирск, 2013. с. 97-102.
- 6 Адлер, Ю.П. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. А. Маркова, Ю. В. Грановский - М.: Наука, 1976. - 279 с.
- 7 Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования. / В. А. Бесекерский, Е. В. Попов – М.: Наука, 1972. - 768 с.
- 8 Патент на полезную модель № 140184, Российская Федерация. Автоматизированный комплекс определения параметров шероховатости и волнистости обработанной поверхности / М. К. Витвинов, С. Л. Леонов, В. А. Хоменко. Зарегистрирован 01.04.2014, опубликован 27.04.2014, бюл. № 12.

В.А. Хоменко - д.т.н., профессор, кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, (3852) 29-08-95

М.К. Витвинов – аспирант кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, vitvink2@yandex.ru