

Р. Р. Башаров, Р. Г. Кудояров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ ПРИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ СТАНКА

В статье изложены основные результаты исследований динамических процессов, протекающих при концевом фрезеровании деталей на высоких частотах вращения и влияющих на формирование размерной погрешности при обработке. В качестве показателя, характеризующего точность обработки, рассматривается траектория движения фиксированной точки, расположенной на оси вращения инструмента. *Высокочастотное фрезерование; электрошпиндель; точность обработки; упругие деформации; динамика процесса фрезерования*

ВВЕДЕНИЕ

Конкурентоспособность металлообрабатывающих станков в значительной степени определяется критериями их работоспособности, к которым относятся: точность, жесткость, виброустойчивость и др. Производительность обработки и качество изготавливаемых деталей зависят от ряда факторов, в частности, от динамических процессов в технологическом оборудовании.

Особенностью современного технического прогресса в машиностроении является рост скоростей резания, увеличение частот вращения шпинделей станочного оборудования, сокращение времени холостых ходов и вспомогательных перемещений, что направлено на увеличение производительности при обработке деталей. Высокие скорости резания сопровождаются изменением физико-механических процессов в зоне резания и динамических процессов в упругой системе оборудования. В связи с малой изученностью данных процессов, является актуальным исследование работы шпиндельных узлов оборудования на высоких частотах вращения.

В теории динамики станков в замкнутой динамической системе в качестве основных сил, действующих на упругую станочную систему, рассматриваются силы резания и трения, вызывающие колебания в этой системе. Естественно, что при повышенных частотах вращения, помимо вышеуказанных сил, на упругую систему шпинделя будет действовать значительная центробежная сила инерции, обусловленная неуравновешенной массой. Например, при работе шпинделя массой 15 кг с эксцентриситетом

10 мкм на скорости 12000 мин⁻¹ возникает центробежная сила инерции, равная 236 Н.

Точность вращения шпинделя оказывает непосредственное влияние на основные показатели качества детали: точность размера и формы обработанной поверхности; точность взаимного расположения обрабатываемых поверхностей друг относительно друга; волнистость и шероховатость поверхности [5].

Экспериментальные исследования траектории движения оси шпинделя, проведенные рядом ученых [1, 2, 7, 8], позволили установить, что траектория вращения шпинделя может иметь сложную форму с периодическими и аperiodическими колебаниями, которые зависят от большого количества факторов. К основным из них относятся: жесткость деталей шпиндельного узла; демпфирующие свойства элементов (рассеяние энергии); масса и дисбаланс вращающихся элементов; геометрическая точность опор; скорость вращения; тепловые деформации. Сложность траектории движения оси шпинделя подтверждает положение о замкнутости динамической системы оборудования, сформулированное В. А. Кудиновым [6]. Суть данного положения заключается в обратном воздействии упругой системы оборудования на рабочие процессы.

В замкнутой динамической системе станка будет наблюдаться взаимосвязь изменений величин силы резания и центробежной силы инерции из-за упругих смещений в станочной системе. Сила резания, действуя на упругую систему оборудования, приводит к изменению величины начального дисбаланса шпинделя. Изменение дисбаланса приводит к изменению величины центробежной силы инерции, которая в свою очередь влияет на изменение толщины срезаемого слоя и силы резания. В результате

происходит сложный процесс изменения действующих сил и упругих деформаций станочной системы, отражающийся на размерной точности обрабатываемой поверхности, производительности обработки и стойкости режущего инструмента.

Математическому описанию и изучению динамики шпиндельных узлов посвящено значительное количество исследований, однако, недостаточно исследовано взаимное влияние центробежных сил и сил резания при обработке деталей на высоких частотах вращения.

ВОЗМУЩАЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ

К основным источникам возмущающих воздействий, влияющих на динамическую систему станка, при обработке на высоких частотах вращения относятся: сила резания; центробежные силы; взаимодействие центробежной силы и силы резания. На рис. 1 приведена схема упругих смещений электрошпинделя, возникающих под воздействием данных сил. Рассмотрим по отдельности каждое воздействие на упругую систему электрошпинделя.

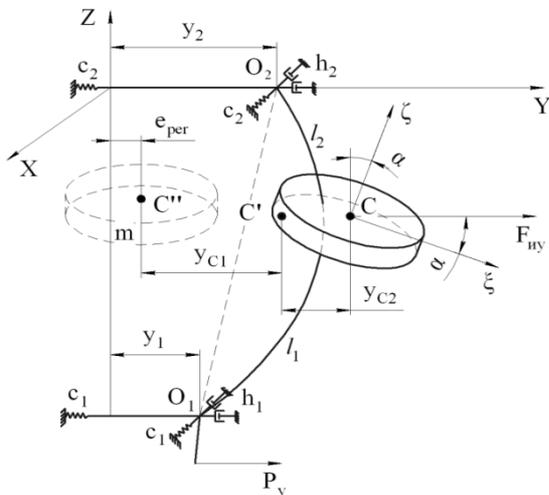


Рис. 1. Упругие смещения электрошпинделя в процессе работы: y_1, y_2 – смещение шпинделя в передней и задней опорах; y_{c1} – смещение центра масс шпинделя из-за смещений в опорах; y_{c2} – смещения центра масс из-за прогиба шпинделя

Процесс резания представляет собой элемент динамической системы станка, входным параметром которого является относительное смещение инструмента и заготовки, а выходным – сила резания, действующая на упругую

систему станка (рис. 3). Деформация упругой системы приводит к снижению точности обработки (например, относительное смещение концевой фрезы в радиальном направлении приводит к изменению глубины резания).

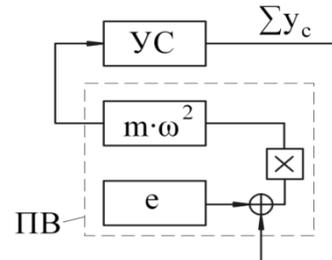


Рис. 2. Блок схема воздействия центробежной силы: УС – упругая система; ПВ – процесс вращения

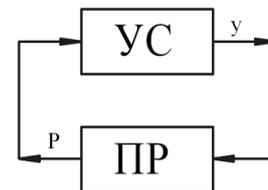


Рис. 3. Блок схема действия силы резания на процесс обработки: УС – упругая система; ПР – процесс резания

При рассмотрении влияния центробежной силы на траекторию движения инструмента при резании, необходимо учесть то, что в зависимости от углового положения, фрезы силы резания будут либо складываться с центробежной силой (рис. 4, а), либо вычитаться, изменяя глубину резания и приводя к размерной неточности и волнистости обработанной поверхности (рис. 4, б, в).

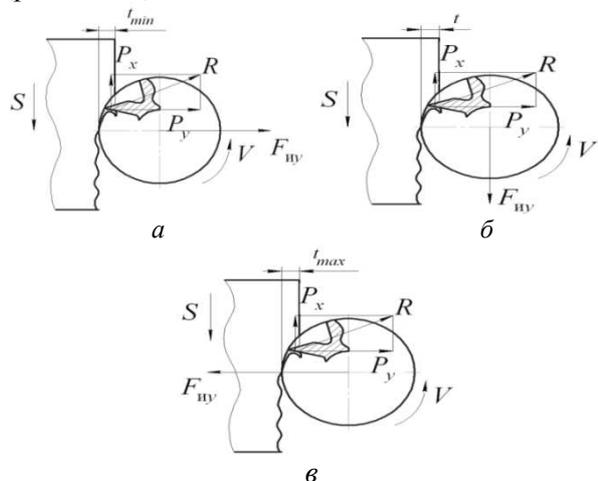


Рис. 4. Совместное влияние центробежной силы и усилия резания при попутном фрезеровании

Центробежная сила в значительной степени будет влиять на точность при фрезеровании концевыми фрезами прямоугольных уступов и вертикальных плоскостей.

С учетом вышесказанного взаимное воздействие силы резания и центробежной силы на УС представлено в виде блок-схемы рис. 5.

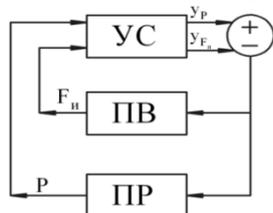


Рис. 5. Воздействие силы резания и центробежной силы на упругую систему: УС – упругая система; ПВ – процесс вращения; ПР – процесс резания

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

Используя разработанную методику моделирования траектории движения оси шпинделя, описание которой приведено в работе [4], разработана математическая модель, описывающая траекторию движения инструмента с учетом взаимного влияния параметров упругой системы шпиндельного узла, вынужденных и параметрических воздействий при обработке деталей концевой фрезой. Под вынужденным воздействием понимается сила резания возникающая при фрезеровании; центробежная сила инерции, возникающая из-за остаточного дисбаланса. Под параметрическим воздействием понимается: изменение силы резания в результате колебания сечения срезаемого слоя из-за деформации упругой системы; изменение центробежной силы инерции из-за колебания величины дисбаланса, вызванное деформацией упругой системы электрошпинделя. Данная математическая модель реализована в среде Matlab Simulink.

На рис. 6 приведена структурная схема алгоритма расчета траектории движения инструмента при фрезеровании. Блоки разработанной структурной схемы предназначены для расчета: P_y – силы резания при фрезеровании; k_1, k_2 – сил, действующих на опоры под влиянием силы резания; k_3, k_4 – сил, действующих на опоры электрошпинделя под влиянием силы инерции; O_1, O_2 – упругих смещений в опорах шпинделя (y_1, y_2); A – смещения консольной части электрошпинделя (y_A); S – смещения центра масс (y_{C2}) вследствие податливости вала шпинделя;

k_{O1}, k_{O2} – смещений центра масс шпинделя (y_{C1}) под действием силы резания.

Математическая модель шпиндельного узла представляется как упругая система. Для математического описания упругой системы произведено ее разделение на отдельные элементы (передняя и задняя опоры электрошпинделя, консольная часть, пролетная часть с центром масс) и нахождение баланса сил, действующих на каждый элемент. Поведение каждого элемента упругой системы описывается в виде уравнения движения при вынужденных колебаниях:

$$m\ddot{y} + h\dot{y} + cy = P, \tag{1}$$

где m – масса, кг; y – перемещение, м; h – коэффициент демпфирования, Н · с/м; c – величина жесткости, Н/м; P – внешнее воздействие, Н.

Сумма остаточного дисбаланса e_{per} и смещения положения центра масс y_{C1}, y_{C2} , в процессе обработки определяет центробежную силу инерции

$$F_{in} = m \cdot \omega^2 \cdot (e_{per} + y_{C1} + y_{C2}). \tag{2}$$

Сумма смещений передней опоры y_1 и консольной части y_A определяет смещение инструмента y_t в процессе обработки, которое в свою очередь влияет на величину силы резания.

На основе рассмотрения механизма процесса фрезерования определены закономерности изменения толщины срезаемого слоя. На основе этого разработана программа, выполняющая расчет толщины срезаемого слоя в зависимости от времени. Данная программа реализована в виде m -функции в среде Matlab, что позволяет пользователю задавать параметры обработки и в автоматизированном режиме получать массив данных, в котором содержатся значения толщины слоя припуска в текущие моменты времени.

Проведено исследование влияния радиальных колебаний концевой фрезы на параметры срезаемого слоя (рис. 7). Радиальные колебания концевой фрезы непосредственно влияют на величину глубины фрезерования. Глубина фрезерования влияет на величину угла контакта инструмента ψ , время контакта отдельного зуба с обрабатываемым материалом и максимальную толщину срезаемого слоя a_{max} .

Толщина срезаемого слоя оказывает влияние на величину силы резания. В связи с этим определены зависимости изменения толщины срезаемого слоя из-за смещения инструмента, которое обусловлено деформацией элементов упругой системы.

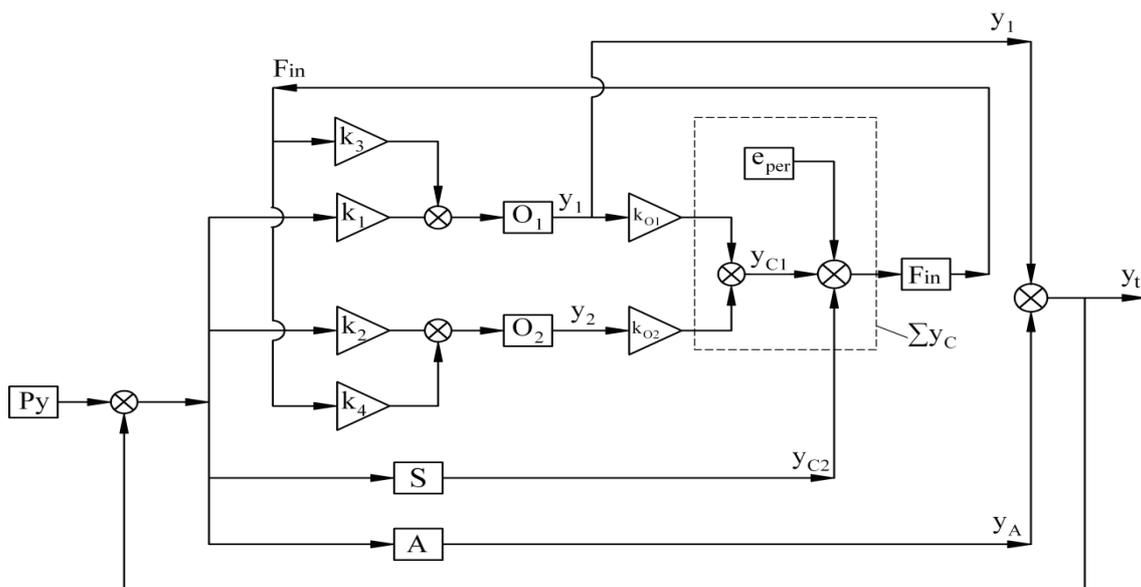


Рис. 6. Структурная схема алгоритма расчета траектории движения инструмента при фрезеровании

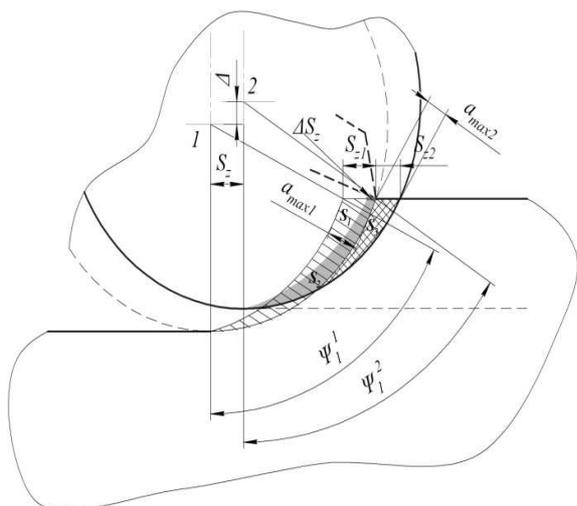


Рис. 7. Изменение параметров срезаемого слоя при колебании инструмента на величину Δ

Зависимость (3) описывает изменение толщины среза при смещении инструмента в направлении от обрабатываемого материала, зависимость (4) – при смещении инструмента в сторону обрабатываемого материала:

$$\Delta a (\Delta > 0) = S_z \cdot \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2t}{D} \right) \right] - (S_z - \sqrt{R^2 - (R-t)^2} + \sqrt{R^2 - (R-t+\Delta)^2}) \times \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2(t-\Delta)}{D} \right) \right], \quad (3)$$

$$\Delta a (\Delta < 0) = (S_z + \sqrt{R^2 - (R-t-\Delta)^2} - \sqrt{R^2 - (R-t)^2}) \times \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2(t+\Delta)}{D} \right) \right] - S_z \sqrt{\frac{4t(D-t)}{D^2}}, \quad (4)$$

где S_z – заданная величина подачи мм/зуб; R – радиус фрезы, мм; Δ – величина колебаний фрезы от относительно детали, мм.

На основе вышеизложенного разработана математическая модель процесса фрезерования, которая учитывает колебания силы резания и деформации упругой системы (рис. 8). Математическая модель реализована в среде Simulink.

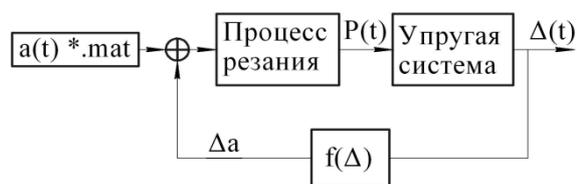


Рис. 8. Блок-схема к расчету силы резания с учетом упругой системы: $a(t) \cdot mat$ – массив толщины срезаемого слоя во времени; $f(\Delta)$ – зависимости (3), (4)

Блок «Процесс резания» генерирует значения силы резания, действующей на упругую систему шпиндельного узла (рис. 9). Упругие смещения $\Delta(t)$, в свою очередь, оказывают влияние на изменение толщины срезаемого слоя

металла $a(t)$. Изменение толщины срезаемого слоя Δa описывается зависимостями (3), (4).

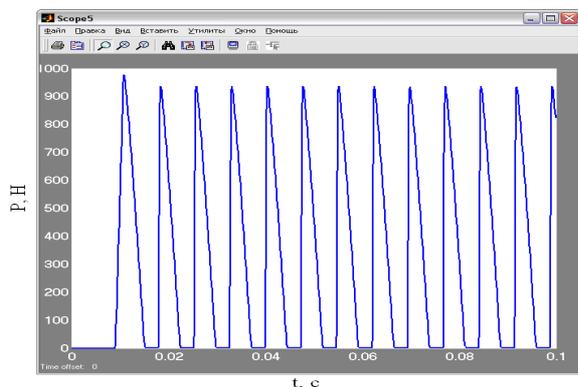


Рис. 9. Пример моделирования силы резания

РАСЧЕТ РАЗМЕРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ

В качестве оборудования для исследования высокочастотного фрезерования был использован сверлильно-фрезерно-расточной станок с ЧПУ модели 500V/5 производства ОАО «Стерлитамак – М.Т.Е». Данный станок оснащен электрошпинделем LC 100 ($12\,000\text{ мин}^{-1}$, 22,5 кВт) фирмы Franz Kessler GmbH (Германия).

Было проведено расчетно-экспериментальное исследование параметров данного оборудования. Определены инерционные характеристики электрошпинделя.

На основе работ В. Б. Бальмонта, В. Ф. Журавлева и др. определена степень изменения радиальной жесткости подшипников передней и задней опор электрошпинделя при их вращении на различных частотах.

Проведено экспериментальное исследование жесткости станка мод. 500 V/5 (подробное описание приведено в работе [3]).

Проведено экспериментальное исследование колебаний упругой системы станка мод. 500V/5 при помощи тест-удара. Измерение сигналов с датчиков вибрации проводилось при помощи модульной USB системы NI CompactDAQ фирмы National Instrument (США). В качестве датчиков вибрации применялись вибропреобразователи AP2019 с частотным диапазоном 0,5...30000 Гц. Получена амплитудно-частотная характеристика колебаний концевой фрезы, по которой определены значения собственных частот.

С учетом найденных параметров оборудования при помощи разработанной математической модели, реализованной в среде Matlab /

Simulink, выполнено моделирование траектории движения инструмента в процессе фрезерования. Результаты моделирования представлены в виде траектории движения точки (рис. 10), расположенной на оси вращения инструмента, которая характеризует размерную точность обработки.

Расчет показал, что после начала фрезерования происходит упругое отжатие инструмента от детали, что соответствует размерной погрешности обработки (рис. 10). С увеличением частоты вращения упругое отжатие инструмента увеличивается.

Моделирование показало, что на высоких частотах вращения восстановление начального положения инструмента при выходе его зубьев из обрабатываемого материала не происходит, так как при обработке на скоростных режимах частота колебаний силы резания выше, чем собственная частота колебаний упругой системы.

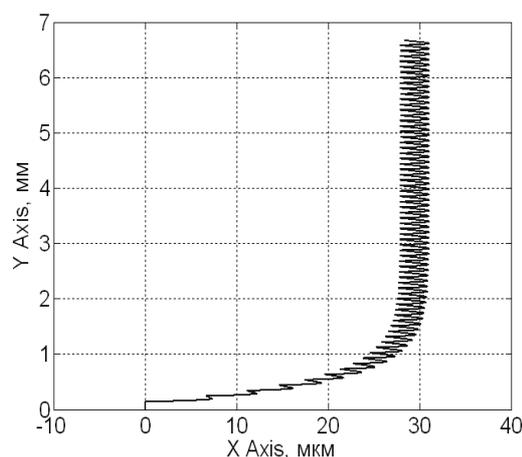


Рис. 10. Расчетная траектория движения оси вращения концевой фрезы при обработке детали из алюминиевого сплава Д16: $z = 4$; $n = 10000\text{ мин}^{-1}$; $S_z = 0,1\text{ мм/зуб}$; $t = 3\text{ мм}$

Экспериментальное исследование размерной точности обработки при высокочастотном фрезеровании

Для проверки адекватности разработанной математической модели были проведены тестовые испытания – фрезерование вертикальной поверхности заготовки из дюралюминиевого сплава Д16 цельной концевой фрезой диаметром 16 мм ($z = 4$) с разными частотами вращения инструмента и при различной глубине резания. Измерение размерной точности обработанной поверхности проводилось с помощью индикатора часового типа с ценой деления 2 мкм. Для получения статистических данных выполнено несколько серий экспериментов. Обраба-

тываемая поверхность была разделена на зоны длиной 60 мм, эти зоны обрабатывались за один проход по программе с автоматическим изменением частоты вращения шпинделя (см. таблицу).

Режимы резания при экспериментальной обработке

Проход	n , мин ⁻¹	t , мм	S_z , мм/зуб
A	1000	0,5	0,075
B	2000 – 12000	1	0,1
C	2000 – 12000	2	0,1
D	2000 – 12000	3	0,1

Результаты измерений показали, что с повышением частоты вращения инструмента снижается размерная точность обработки, так как уменьшается фактический сьем металла из-за деформации упругой системы. Данное обстоятельство подтверждается появлением местных углублений на обработанной поверхности в процессе вращения шпинделя при отсутствии подачи. Значения сил резания, рассчитанные на основе измеренной активной мощности электрошпинделя, также свидетельствуют об уменьшении фактического съема металла на высоких частотах фрезерования.

На рис. 11 представлены результаты измерения по средним значениям (M). Максимальная средняя размерная погрешность обработки на высоких частотах составила 40 мкм при глубине фрезерования 3 мм.

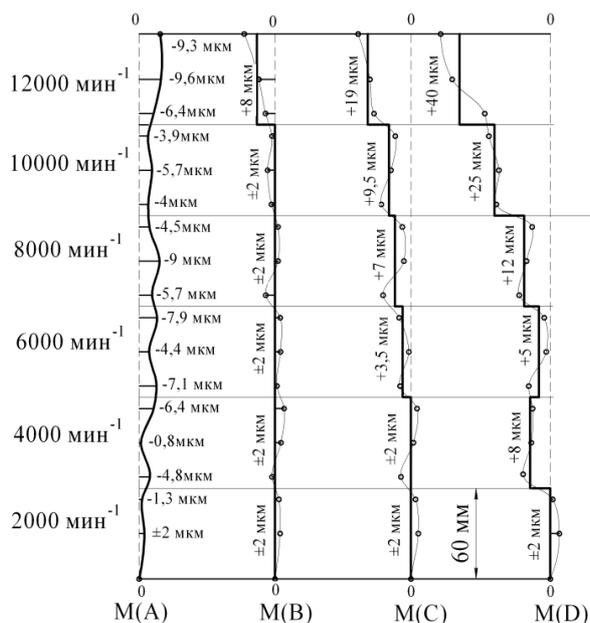


Рис. 11. Профили поверхности детали после обработки на различных режимах

Снижение размерной точности характерно при обработке на частотах вращения 6000–12000 мин⁻¹. При обработке на меньших частотах вращения ($n \leq 6000$ мин⁻¹) на величину размерной точности, в основном, влияет только глубина резания.

Анализ полученных расчетных и экспериментальных значений размерных погрешностей при обработке детали (рис. 12) показал, что расхождение результатов расчета с экспериментальными данными не превышает 8 мкм. При этом форма расчетной кривой позволяет учесть погрешность математической модели с помощью эмпирического коэффициента k_{Δ} . Тем самым доказана адекватность разработанной математической модели шпиндельного узла, учитывающей упругие отжатия при обработке на высоких частотах вращения.

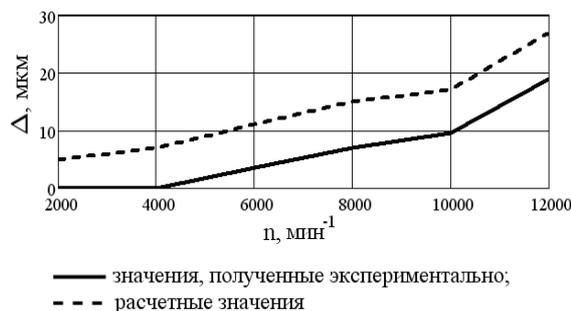


Рис. 12. Экспериментальные и расчетные значения отклонений размера деталей:
 $t = 2$ мм; $S_z = 0,1$ мм/зуб

ВЫВОДЫ

1. Разработана структурная схема и математическая модель шпиндельного узла, реализующие принцип замкнутости динамической системы. Модель реализована в среде Matlab / Simulink с возможностью автоматизированного расчета и вывода на график траектории движения точки оси инструмента в процессе концевго фрезерования.

2. Выявлены закономерности изменения толщины срезаемого слоя припуска и силы резания в зависимости от угла поворота концевой фрезы и ее смещений, вызванных податливостью элементов шпиндельного узла. На этой основе разработаны программа расчета толщины срезаемого слоя припуска при движении зуба фрезы в процессе обработки и математическая модель силового воздействия на упругую систему электрошпинделя, которая учитывает изменение силы резания из-за переменности

сечения срезаемого слоя и деформации упругой системы в процессе фрезерования.

3. Выявлены закономерности образования размерной погрешности обработки при концевом фрезеровании под влиянием упругих деформаций, обусловленных конструктивными параметрами шпиндельного узла и режимами резания на высоких частотах вращения шпинделя.

Установлено, что на размерную точность деталей существенно влияет разница скорости изменения силы резания во время обработки и скорости упругого восстановления начального положения инструмента относительно детали при выходе зуба фрезы из обрабатываемого материала. Эта разница возрастает с повышением частоты вращения шпинделя и приводит к увеличению погрешностей обработки от $3\div 7$ мкм при $n = 2000$ мин⁻¹ до $14\div 38$ мкм при $n = 12000$ мин⁻¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балакшина. Б. С.** Адаптивное управление станками. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.
2. **Решетов Д. Н.** Детали и механизмы металлорежущих станков: в 2 т. М.: Машиностроение, 1972. Т. 2. 520 с.
3. **Кудояров Р. Г., Башаров Р. Р.** Исследование жесткости многоцелевого станка 500V/5 // Современные тенденции в технологиях металлообра-

ботки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 234–240.

4. **Кудояров Р. Г., Башаров Р. Р.** Расчетный метод определения траектории движения оси шпинделя станка при высокоскоростной обработке // Технология машиностроения. 2011. № 4. С. 26–29.

5. Виброакустическая диагностика опор шпинделей станков для высокоскоростной обработки / М. П. Козочкин [и др.] // СТИН. 2010. № 6. С. 17–21

6. **Кудинов В. А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.

7. **Соколовский А. П.** Точность механической обработки и пути ее повышения. М.: Машгиз, 1951. 457 с.

8. **Юркевич В. В.** Измерение траектории формообразования при сверлении // Измерительная техника. 2006. № 8. С. 31–33.

ОБ АВТОРАХ

Башаров Рашит Рамилович, инженер каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. высокоскоростной обработки.

Кудояров Ринат Габдулхакович, проф. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ. -техн. обработки (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. разработки мехатронных станочных систем.

