

А. М. Козлов, Е. В. Кирющенко

## СОЗДАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

В работе рассматривается динамическая система контроля качества обработанной поверхности при фрезеровании плоских поверхностей на базе индуктивных бесконтактных датчиков. Система контроля интегрирована в станочную оснастку и позволяет выполнять измерения в режиме реального времени, обеспечивая наличие отрицательной обратной связи в системе управления станка. Система контроля качества поверхности; отрицательная обратная связь; фрезерование; бесконтактный датчик; динамическая система

### ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью агрегатов и машин горно-металлургической промышленности являются их большие габариты. Отдельные детали имеют массу более 40 т. и их обработка требует наличия крупногабаритного оборудования. Ремонт таких деталей, если он связан с механической обработкой, представляет достаточно сложную задачу. В этом случае используют технологию обработки непосредственно в месте работы машины или агрегата. Отличительной особенностью данной технологии является установка станочного оборудования непосредственно на деталь, причем обрабатывается не вся деталь, а ее отдельные участки. Недостатком такого метода является малая жесткость технологической системы. Дополнительные сложности возникают из-за большой протяженности поверхности обработки.

Отличительной особенностью технологической системы при обработке крупногабаритных деталей является тесная взаимосвязь процесса резания с динамикой системы, качеством и производительностью обработки. Для практической реализации технологии обработки таких деталей необходимо выбрать допустимые режимы резания, установить значения вибродиагностических параметров технологической системы для управления качеством обрабатываемой детали и техническим состоянием самой системы.

Крупногабаритные детали обладают высокой стоимостью, поэтому при механической обработке их поверхностей лезвийным инструментом особое внимание уделяется точности и качеству обработанных поверхностей. Для выявления механизма возникновения отклоне-

ний формы и расположения обработанной поверхности и их оценки необходим анализ системы в динамике, т. е. с учетом фактора времени.

### ОБЩИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Нами рассматривается процесс торцового фрезерования плоской поверхности станины прокатного стана (Стан 2000) имеющей размеры  $5000 \times 1000$  мм. Анализ проводился как экспериментально, так и с помощью компьютерного моделирования в среде программного обеспечения Autodesk Inventor 2010 и MathCAD 14.

Принято, что деталь, из-за значительных габаритов и массы, условно не испытывает вибраций, но является их проводником к опорам станка. Рассматриваемая технологическая система воспринимает вибрации, возникающие в результате работы узлов станочного оборудования (погрешность установки и изготовления, дисбаланс вращающихся механизмов), которые являются следствием динамических процессов в зоне резания, через приспособление (оправку) и деталь. Поэтому технологическую систему в данном случае можно считать замкнутой.

Рассмотрение технологической системы в динамике подразумевает, что взаимосвязи в ней описываются нелинейными уравнениями. Нелинейная система может рассматриваться как система дифференциальных уравнений.

Для рассмотрения процесса фрезерования во времени необходимо учитывать его особенности. Такой особенностью является запаздывание:

$$\tau = \frac{1}{n \cdot z}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – запаздывание, т. е. промежуток времени, через который на деталь действует сила резания, равняется времени поворота зуба на угол  $2\pi/z$ ;  $n$  – частота вращения, об/мин,  $z$  – число зубьев фрезы [1].

Наличие запаздывания в динамических системах часто является причиной возникновения неустойчивости их работы. Его необходимо учитывать при расчете сил резания. Например, приращение каждой из составляющих силы резания может быть рассчитано по формуле:

$$\Delta F = -(F(t) - F(t - \tau)). \quad (2)$$

Таким образом, технологическую систему фрезерования поверхностей крупногабаритной детали в динамике можно рассматривать как замкнутую нелинейную систему с запаздыванием. Такой системе может соответствовать математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений, полученная с использованием уравнения Лагранжа. В качестве примера такой модели можно привести следующее уравнение:

$$[M] \cdot [\ddot{q}] + [D] \cdot [\dot{q}] + [C] \cdot [q] = [\bar{F}] + [X], \quad (3)$$

где  $[q]$  – вектор обобщенных координат,  $[\bar{F}]$  – вектор внешних сил и моментов, действующих на систему,  $[M]$ ,  $[D]$ ,  $[C]$  – матрицы инерционных, диссипативных и жесткостных параметров,  $[X]$  – матрица случайных параметров.

Нелинейные системы по сравнению с линейными обладают рядом принципиальных особенностей. В частности, такими особенностями является следующее:

- не выполняется принцип суперпозиции, и исследование нелинейной системы при нескольких воздействиях нельзя сводить к исследованию при одном воздействии;
- устойчивость и характер переходного процесса зависят от величины начального отклонения от положения равновесия;
- при фиксированных внешних воздействиях возможны несколько (а иногда и бесконечное множество) положений равновесия;
- возникают свободные установившиеся процессы, которые в линейных системах невозможны (например, автоколебания).

Универсальных аналитических (математических) методов исследования нелинейных систем нет. В процессе развития теории автоматического управления были разработаны различные математические методы анализа и синтеза

нелинейных систем, каждый из которых применим для определенного класса систем и задач. Наиболее широко используемыми методами исследования нелинейных систем являются:

- метод фазовой плоскости;
- метод функций Ляпунова;
- метод гармонической линеаризации (метод гармонического баланса);
- методы исследования абсолютной устойчивости.

Любое исследование более или менее сложных нелинейных систем, как правило, заканчивается математическим моделированием. И в этом отношении математическое моделирование является одним из универсальных (неаналитических) методов исследования.

Нелинейную динамическую систему можно проанализировать с помощью метода линеаризации обратной связью. Линеаризация обратной связью (ЛОС) является не приближенным, а эквивалентным преобразованием: в результате ЛОС получается система, эквивалентная исходной системе. При ЛОС управление и заменяется новым управлением. Функция преобразования, кроме нового управления, включает вектор состояния (в частном случае – только выходную переменную). Поэтому при этом преобразовании объект охватывается обратной связью

Так как мы рассматриваем систему с запаздыванием, то для дальнейшего математического моделирования нам необходимо добиться устойчивости системы к воздействию случайных факторов. Для полного описания состояния и тенденции поведения динамического объекта с запаздыванием требуется задать не только значения переменных состояния в некоторый момент времени, но и предысторию их изменения, помещенную в данном случае в буфер звена запаздывания. Разные предыстории приводят к разным траекториям фазового портрета, т. е. к разному поведению объекта. Прогноз поведения выходной переменной звена запаздывания (переменной состояния  $x_3$ ) эквивалентен предыстории поведения его входной величины, поскольку представляет собой задержанную на время запаздывания эту самую предысторию (рис. 1).

Поведение объекта с запаздыванием определяется не только начальными значениями его переменных состояния, но и предысторией поведения входных величин звеньев запаздывания, эквивалентных прогнозу «запаздывающих» переменных состояния. Интервал, на котором следует знать предысторию определяется величиной задержки в звене запаздывания [2].

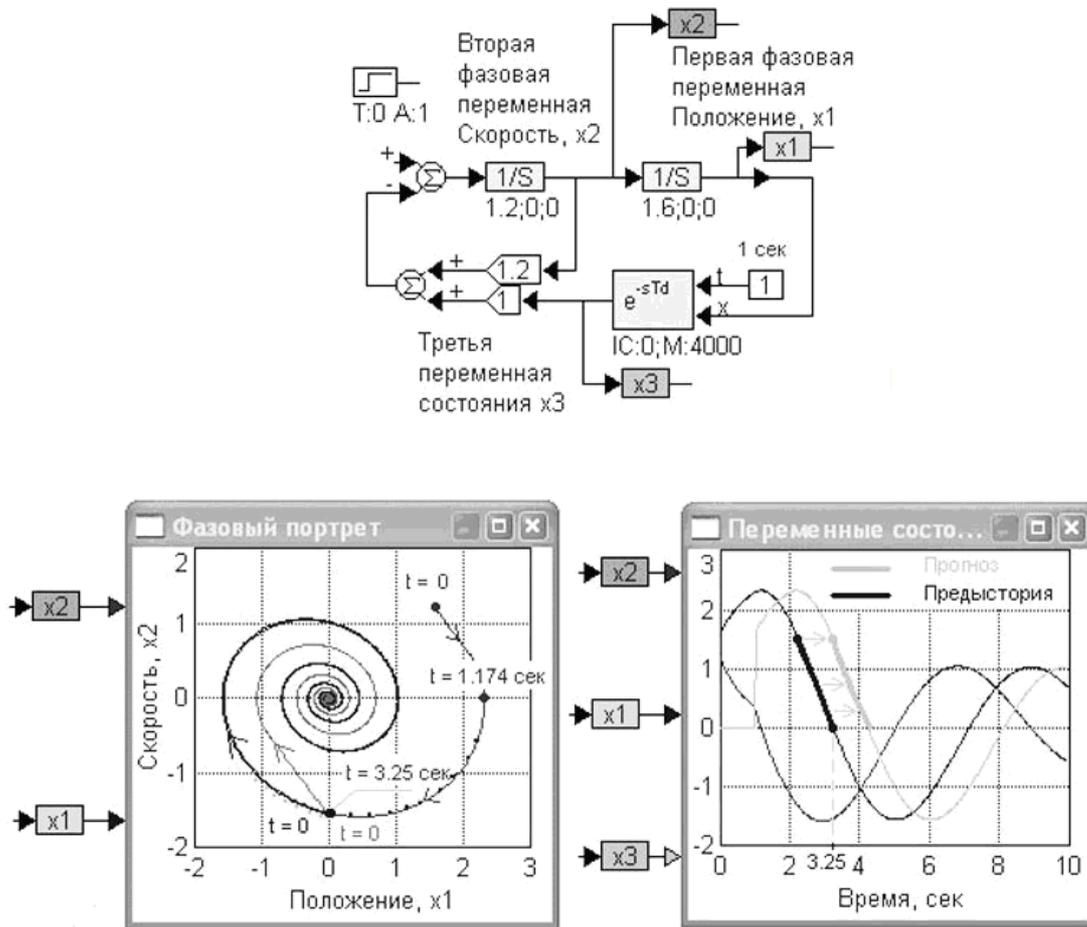


Рис. 1. Фазовые портреты и поведение переменных состояния динамического объекта с запаздыванием в отсутствие внешних воздействий

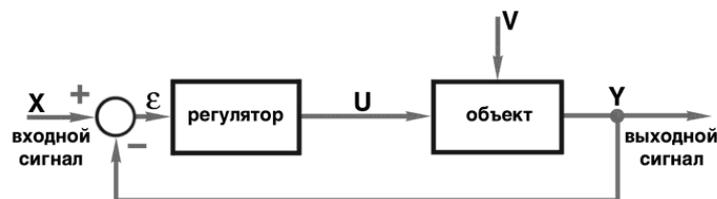


Рис. 2. Схема отрицательной обратной связи:  $X$  – входной сигнал;  $Y$  – выходной сигнал;  $V$  – возмущение;  $\varepsilon$  – сигнал рассогласования,  $U$  – сигнал управления

С точки зрения моделирования это означает, что параметры матрицы  $[X]$  в уравнении (3) нам неизвестна. Но мы можем определить фактические значения выходных параметров за счет наличия соответствующих систем контроля вибрации и качества поверхности, создав таким образом обратную связь в системе. Если мы стремимся к качеству лезвийной обработки, это означает, что значения выходных параметров

должны соответствовать определенному, заданному нами эталону, с отклонениями от него в относительно малом диапазоне. Поэтому в данном случае речь идет об отрицательной обратной связи. Та обратная связь, которая способствует поддержанию стабильности системы, называется отрицательной обратной связью. Все технические системы, где главная функция – обеспечение стабильности некоего фактора, ис-

пользуют этот механизм. Задача отрицательной обратной связи состоит в том, чтобы в ответ на внешние воздействия на систему вырабатывать собственное управляющее воздействие, устраняющее последствия этих внешних воздействий. Отрицательная обратная связь делает систему более устойчивой к случайному изменению параметров.

### УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ СВЯЗИ

Принцип управления, основанный на использовании отрицательной обратной связи, характеризуется тем, что не требует градуировки и сохраняет высокую точность и в тех случаях, когда нагрузка и параметры элементов системы со временем изменяют свои значения. В этом заключается основное достоинство систем с обратной связью [5].

В системах с замкнутым циклом или обратной связью точность регулирования, т. е. точность поддержания требуемой функциональной связи (в частности, пропорциональной) между входом и выходом, в основном зависит от точности, с которой проводят измерение и сравнение требуемого и действительного значений регулируемой переменной (рис. 2).

Системы управления с обратной связью – это системы автоматического регулирования (САР). Изменения регулируемых величин вызывают не только управляющие, но и возмущающие воздействия, приложенные в соответствующих точках системы автоматического регулирования. Управление осуществляет целенаправленное изменение регулируемых переменных. Возмущение стремится нарушить требуемую функциональную связь между управляющим воздействием и регулируемой переменной. САР должна вести себя по отношению к управляющему и возмущающему воздействиям различным образом. Необходимо, чтобы система осуществляла управление с наименьшими погрешностями, компенсируя действие возмущений на регулируемые переменные.

При компьютерном моделировании процесса фрезерования крупногабаритных деталей мы должны прежде всего учитывать воздействия на систему через инструмент (рис. 3).

Внешние воздействия на систему приводят к тому, что требуемые и действительные значения регулируемой величины отличаются друг от друга. Разность между необходимым и действительным значением регулируемой величины

является ошибкой системы автоматического регулирования.

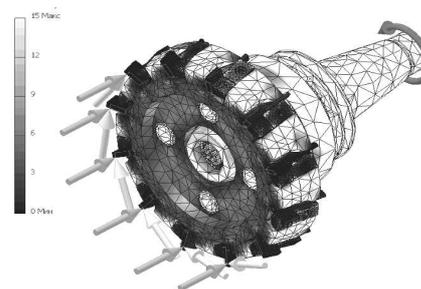


Рис. 3. Анализ вибраций торцевой фрезы в сборе с оправкой, на основе компьютерного моделирования в среде Autodesk Inventor

При введении отрицательной обратной связи система слабо реагирует на возмущающие воздействия и подчиняется главным образом управляющему воздействию, т. е. замкнутая система регулирования по существу представляет собой фильтр, который достаточно точно воспроизводит управляющее воздействие и подавляет возмущающее. Сигнал, который поступает с выхода системы на ее вход, называют сигналом главной обратной связи, а разность между входным сигналом и сигналом главной обратной связи – сигналом ошибки. САР являются системами направленного действия. Это означает, что выходной сигнал последующего элемента может оказать влияние на формирование ошибки на выходе элемента сравнения только через обратную связь [4].

Итак, САР – это замкнутая активная динамическая система направленного действия, преобразующая установку на ее входе в регулирующее воздействие, непосредственно прикладываемое к объекту управления. Наличие подобной системы контроля особенно актуально при механической обработке корпусных крупногабаритных деталей, т. е. когда протяженность обработки и время обработки (время контакта инструмента и заготовки) достаточно велики.

### СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАК ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Задача нашей работы состоит в получении требуемого качества обработанной поверхности детали при воздействии случайных факторов обработки (неоднородность поверхностного слоя заготовки, плохое качество отдельных эле-

ментов инструмента и станочной оснастки, человеческий фактор и т. д.) за счет варьирования режимов резания при соответствующей системе управления. Это создает необходимость использования, наряду с системой управления оборудования, адаптивных систем динамического контроля различных параметров качества поверхности. В случае с фрезерованием плоских поверхностей большой площади, речь идет о системе контроля отклонений от плоскостности и шероховатости непосредственно в процессе обработки, которая позволит своевременно реагировать на воздействие факторов обработки и избежать брака [6].

Для этой цели мы предлагаем использовать систему контроля на базе индуктивных бесконтактных датчиков положения. Датчики положения являются первичными источниками информации для систем автоматики как на основе релейных или логических схем, так и на базе программируемых контроллеров. Именно бескон-

тактные датчики положения часто располагаются в зоне воздействия вибрации, пыли, воды, агрессивных жидкостей, предельных температур и электромагнитных помех, и надежность их работы определяет надежность всей системы управления. Сейчас широко применяются индуктивные бесконтактные датчики положения, благодаря их работоспособности в широком диапазоне температур и надежности в тяжелых промышленных условиях. Эти устройства срабатывают при приближении к их чувствительному элементу металлической пластины или конструкции (рис. 4).

С конструктивной точки зрения лучше применить индуктивные датчики, имеющие цилиндрический корпус с наружной резьбой и двумя гайками. Под пластиковым колпачком с одного торца находится чувствительный элемент. Этот корпус позволяет легко обеспечить установку и регулировку положения датчика относительно объекта воздействия [3].

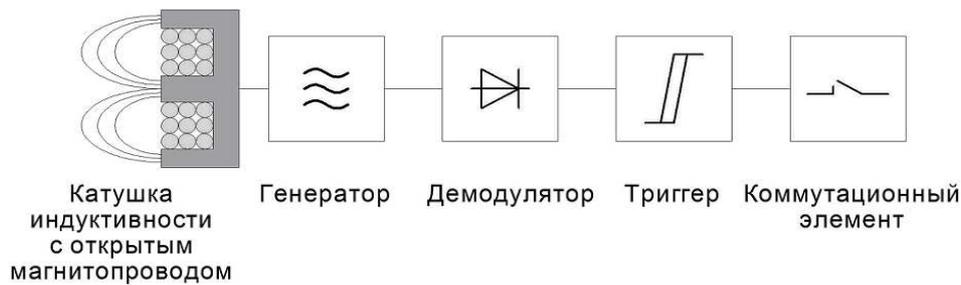


Рис. 4. Функциональная схема индуктивного датчика положения



Рис. 5. Схема системы динамического контроля отклонений от плоскостности



Рис. 6. Граница срабатывания индуктивного датчика

Датчик измеряет расстояния в одной заданной точке, поэтому для измерения отклонений от плоскостности необходимо использовать три датчика. Измерения должны проводиться максимально близко к зоне обработки. В связи с этим была разработана схема (рис. 5), при которой три датчика размещаются в цилиндрическом корпусе, ось которого совмещена с осью шпинделя станка. В этом случае необходимо зафиксировать датчики в одном положении при вращении шпинделя. Для этого предлагается использовать шариковые подшипники качения легкой и особо легкой серий. Они имеют наименьшие потери по трению, соответственно могут работать на больших скоростях вращения. Кроме того, соединительные кабели датчиков находятся в кабелепроводе, расположенном вдоль оси шпинделя, который так же имеет опорные подшипники. По кабелепроводу достаточно удобно проложить соединительные кабели для датчиков при подключении системы. Корпус с установленными датчиками вставляется в станочную оснастку с внешней стороны, при этом опорный подшипник корпуса фиксируется стопорными кольцами снаружи, а внутри устанавливается упругий элемент (на рис. 5 рассмотрен вариант с конической пружиной), который создает достаточное распорное усилие для исключения поворота внутреннего кольца подшипника корпуса.

В эксплуатации приближение объекта к индуктивному датчику, как правило, производится не вдоль относительной оси, а перпендикулярно ей. При этом точка срабатывания в пределах гарантированного интервала срабатывания зависит от удаления объекта от активной поверхности. При наличии люфтов в механизмах это нужно учитывать и располагать пластину на минимально возможных расстояниях от активной поверхности с учетом люфтов (рис. 6).

В предложенной нами схеме наружные кольца подшипников вращаются вместе со станочной оснасткой, а внутренние остаются неподвижными, что делает возможным подключить датчик к системе ЧПУ оборудования. Для удобства обслуживания и эффективного использования систему измерения, работающую по предложенной схеме, нужно интегрировать в станочную оснастку. Три датчика положения располагаются по окружности относительно оси инструмента (шпинделя). В случае фрезерной обработки – система устанавливается в оправку для фрезы. Компьютерное моделирование работоспособности данной системы проводилось на базе оправки для насадных торцовых фрез, центрируемых по отверстию, к станкам с ЧПУ (рис. 7). Создание моделей проводилось на базе пакета программ КОМПАС-3DV12 и Autodesk Inventor 2010.

Функционирование разработанной нами системы контроля осуществляется на базе управляющей программы (УП), разработанной на основе динамической модели процесса фрезерования. Динамическая модель, заложенная в УП, определяет взаимосвязь между величиной отклонений от плоскостности и различными факторами, влияющими на технологическую систему, в частности – вибрацией. Оценка отклонений от плоскостности производится согласно рассматриваемой схеме (рис. 8), по двум критериям:

Определяется отклонение от эталонного значения. Эталонное значение показаний датчиков  $l_0$  задается, исходя из глубины резания. Далее в одном из модулей УП определяется разность между предельными показаниями датчиков и  $l_0$ .

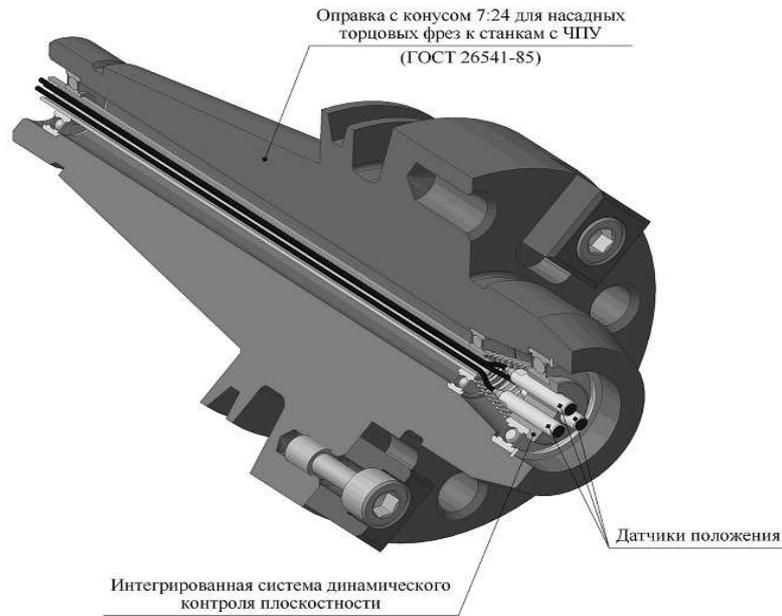


Рис. 7. Оправка для торцовой фрезы с интегрированной системой контроля отклонений от плоскостности

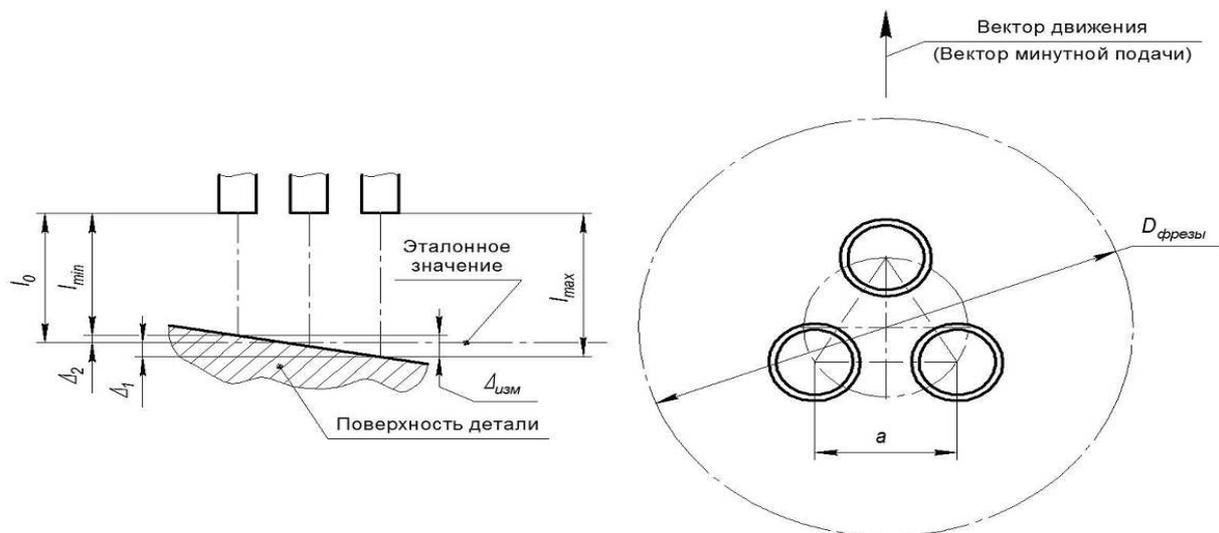


Рис. 8. Схема работы предлагаемой системы контроля

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= |l_{\max} - l_0|; \\ \Delta_2 &= |l_{\min} - l_0|. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученные значения  $\Delta$  сравниваются с предельными отклонениями, заданными по чертежу. Если значения  $\Delta$  больше, то УП выдает рекомендации по изменению параметров обработки или меняет их автоматически, взаимодействуя с САМ-системой. Для своевременного реагирования необходимо предельные отклонения по чертежу делить на два. Таким образом, определяются отклонения от плоскостности на локальном участке поверхности детали в заданный момент времени.

Определяется пространственное положение плоскости. Оно определяется как проекция равностороннего треугольника (по вершинам которого проходят измерения) со стороной  $a$  (рис. 8) на обработанную поверхность детали. По разности в показаниях датчиков определяется угол наклона поверхности на заданном участке относительно эталонного уровня и определяется наибольшая разность в показаниях:

$$\Delta_{\text{изм}} = l_{\max} - l_{\min}. \quad (5)$$

Значение  $\Delta_{\text{изм}}$  рассчитывается с заданным временным интервалом, по мере того, как ось инструмента смещается на определенное рас-

стояние, относительно начала обработки (которое задается требованиями чертежа). Таким образом, определяется отклонение от плоскостности на заданной длине участка поверхности детали в процессе обработки с возможным прогнозом изменения отклонений по измерению угла наклона.

Наличие интегрированной системы контроля на базе бесконтактных датчиков позволит вести мониторинг непосредственно в зоне резания основных динамических параметров: уровня виброскорости и изменения отклонений от плоскостности, в режиме реального времени. В результате появляется возможность для автоматизации ряда технологических операций: изменение сложной траектории инструмента, вспомогательные ходы, операции контроля, а также улучшается качество обработанной поверхности.

### ВЫВОДЫ

1. Технологическую систему при фрезеровании плоских поверхностей следует рассматривать как нелинейную динамическую систему с запаздыванием.

2. Анализ и математическое моделирование динамики системы с запаздыванием упрощается при наличии отрицательной обратной связи.

3. Отрицательная обратная связь делает технологическую систему более устойчивой к случайному изменению параметров.

4. Разработана система контроля качества поверхности при фрезеровании плоскости, которая позволит:

- повысить производительность обработки на 7–10 % за счет снижения времени холостых ходов в результате автоматической коррекции режимов резания и контроля выходных параметров обработки с высокой точностью в режиме реального времени;

- повысить качество обрабатываемой поверхности за счет контроля уровня вибрации в режиме реального времени и коррекции режимов обработки при его изменении;

- использовать в системе управления металлорежущим оборудованием управляющие программы на базе динамических моделей за счет создания отрицательной обратной связи, посредством системы динамического контроля, что делает возможным линеаризацию нелиней-

ных уравнений, описывающих динамику технологической системы;

- повысить срок службы инструмента.

Разработанная нами система контроля делает измерение непосредственно в процессе обработки, что позволяет своевременно реагировать на изменения в технологической системе, обусловленные влиянием трудно прогнозируемых факторов. Применение данной системы возможно при наличии соответствующей динамической модели процесса обработки. Однако использование этой системы контроля в сочетании с УП на базе динамической модели, позволит включить в модель трудно прогнозируемые факторы процесса обработки, значительно повысив надежность технологической системы в целом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Городецкий Ю. И.** Фундаментальные проблемы нелинейной динамики станков // Динамика технологических систем: сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2004 г.

2. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 464 с.

3. **Криворученко А.** Компоненты и технологии // Бесконтактные датчики положения. Проблема выбора и практика применения. 2007. № 1. С. 32–35.

4. **Козлов А. М., Кирющенко Е. В.** Зависимость параметра виброскорости от прогнозируемых факторов процесса торцового фрезерования // Современные проблемы машиностроения: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. 266 с.

5. **Николаев А.** SURFCAM 2002 plus // Что нового? САПР и графика. 2003. № 6. С. 43–47.

6. **Степанов А.** Высокоскоростное фрезерование в современном производстве // CAM/CAE Observer. 2003. № 4. С. 2–8.

### ОБ АВТОРАХ

**Козлов Александр Михайлович**, зав. каф. технологии машиностроения Липецк. гос. техн. ун-та. Дипл. инженер по технологии машиностроения. Проф., д-р техн. наук по технологиям и оборудованию механической и физико-технической обработки.

**Кирющенко Евгений Владимирович**, аспирант той же каф. Дипл. инженер по технологии машиностроения (ЛГТУ, 2006).