

# ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Рассмотрены вопросы управления качеством механической обработки путем исследования внешнего проявления работы технологической системы. Прогнозирование поведения технологической системы проводится с использованием имитационных моделей, при этом моделируется не сам процесс обработки, а процесс управления им.*

**А.С. Гордеев**

*Кафедра технологии машиностроения  
Украинской инженерно-педагогической академии,  
ул. Университетская, 16,  
Харьков, 61003, УКРАИНА.*

## 1. Введение

Невысокое качество изделий по таким показателям как долговечность и надежность в большинстве случаев является следствием их низкой точности изготовления. Одним из важнейших факторов качества промышленной продукции является качество обработанных поверхностей элементов изделий, включающее в виде важнейшей составной части точность обработки и геометрические характеристики поверхности (шероховатость, волнистость, отклонения формы). Понятия «точность» и «качество» неразрывно связаны между собой. Современная наука о точности, используя законы теории вероятностей, решает задачу установления границ рассеяния размерных и других параметров. Однако более важное значение имеет решение задачи уменьшения самого рассеяния, что обеспечивается управлением технологическим процессом.

Существует ряд задач, связанных с точностью обработки, решение которых еще не достигнуто из-за недостаточной изученности явлений, сопровождающих процесс резания. Обеспечение высокого качества наукоемкой продукции представляет сложную комплексную проблему.

Известны различные методы управления погрешностью механической обработки. Так, для достижения тре-

буемой технологической точности обработки, получило распространение повышение первоначальной точности станка за счет резкого повышения точности изготовления деталей самого станка. Однако использование этого метода управления качеством работы системы СПИД требует значительных экономических затрат.

Другой метод управления погрешностью механической обработки, связан с созданием и использованием специальных устройств, позволяющих регистрировать величину воздействия различных элементарных составляющих суммарной погрешности обработки заготовок. Но это связано с изготовлением и применением дорогостоящей и иногда уникальной аппаратуры, что для условий серийного производства (характерного для рыночной экономики) в большинстве случаев экономически не выгодно и практически не реализуемо.

Анализ применяемых в настоящее время в технологии машиностроения методов оценки и управления суммарной погрешностью обработки на основе составляющих этой погрешности позволил прийти к выводу о нецелесообразности их использования в задачах управления качеством механической обработки. Это объясняется наличием больших значений ошибок, получаемых в результате расчетов, а также большой трудоемкостью получения исходных данных для расчетов.

Современная концепция обеспечения качества машин и механизмов требует не просто нахождения параметров изготовленных деталей и сборочных единиц в пределах допуска, но и минимального разброса этих параметров относительно номинальных (повышение запаса точности). Данная концепция требует принципиально нового подхода при разработке как технологического процесса, так и технологического оборудования. Для технологических процессов характерно не только отсутствие удовлетворительного математического описания, но и неполнота оперативной информации о ходе механической обработки. Такие объекты принято называть плохо определенными.

**2. Современные системы обеспечения качества механической обработки и их анализ**

Современные системы обеспечения качества механической обработки по характеру управления можно разделить на три группы: управление по статистическим данным, адаптивное управление и имитационное управление (рис.1).



**Рисунок 1.** Системы управления качеством механической обработки

Управление по статистическим данным позволяет выявлять существующий дрейф качественных характеристик и управлять процессом обработки, как по среднестатистическому значению параметров, так и по их дисперсии. Однако этот способ не гарантирует отсутствие брака в уже изготовленной партии, а также наличие случайных выбросов в последующем.

Применение адаптивного управления более перспективно. Оно позволяет за счет обратной связи самонастраиваться системе обработки в процессе работы даже при наличии недостаточного объема априорной информации об объекте или действующих возмущениях. Однако последнее обстоятельство не позволяет, во-первых, использовать эти системы для прогнозирования качества, а, во-вторых, все более возрастающая сложность систем адаптивного управления сама порождает дополнительные возмущения, ограничи-

вая, тем самым, возможности управления качеством обработки. Проф. Л.А. Заде считает [1], что по мере возрастания сложности технологических систем наша способность формулировать точные, содержащие смысл утверждения о ее поведении, уменьшается вплоть до некоторого порога, за которым точность и смысл становятся взаимоисключающими. Причина такого положения в многофакторности, сложном характере взаимодействия факторов, взаимосвязи критериев качества между собой и неопределенности как состояния технологической системы в текущий момент времени, так и ее поведения в будущем.

Прогнозировать поведение технологической системы позволяют имитационные модели. Данное направление в практике технологии машиностроения до сих пор не нашло широкого применения. Это объясняется отсутствием теоретических разработок в области синтеза имитационным моделям механической обработки. Кроме того, низкие технические характеристики систем ЧПУ (2P22, НЦ-31 и др.) не позволяют включать в их состав имитационные управляющие программы.

Широко распространенный подход в технологических исследованиях основан на изучении физических закономерностей и их использовании при параметрической оптимизации или аппроксимации систематических погрешностей. Полученные таким способом математические модели получаются слишком упрощенными, а найденные на их основе оптимальные условия недостаточно адекватно и эффективно отражают реальные технологические системы и процессы.

Кроме того, деление погрешностей механической обработки на детерминированные и случайные имеет много неопределенностей. Например, износ инструмента традиционно относится к детерминированным процессам, а с математической точки зрения этот процесс описывается марковскими цепями (аппарат, применяемый для описания случайных процессов). Во многих случаях трудно решить, относится ли рассматриваемое явление к детерминированному или случайному. Можно, например, утверждать, что в действительности ни один технологический фактор нельзя считать строго детерминированным, поскольку всегда существует возможность того, что в будущем какое-либо непредвиденное событие изменит течение процесса таким образом, что полученные данные будут носить характер совершенно иной, чем предполагалось ранее. С другой стороны, можно полагать, что в действительности ни один физический процесс не имеет строго случайной природы, существуют лишь полигармонические процессы: слияние детерминированных последовательностей на фоне существования так называемого «белого шума» – некоррелированных процессов.

Онтологическое представление (путем вскрытия механизмов происходящих явлений) структуры моделируемой технологической системы практически сложно. Поэтому необходимо получать феноменологические структуры, которые представляют семантическую информацию о технологической системе. Иными словами, необходимо изучать технологические системы

путем исследования внешнего проявления ее работы и построения моделей функционирования по результатам наблюдений.

Проведенный анализ многочисленных точечных диаграмм, полученных при наружном точении, показал, что:

1) рассеяние размеров при механической обработке носит полигармонический характер на фоне существования белого шума (использовался спектральный аппарат выявления скрытых периодичностей);

2) частотные характеристики являются устойчивыми в рамках отдельно взятого станка (устойчивость проверялась по Ляпунову).

На рис.2.а построен график нормированной корреляционной функции по данным, полученным при наружном продольном точении. При аналитическом рассмотрении графика  $\rho(\tau)$  можно сделать следующие выводы. Имеется эргодический процесс, так как изменения кривой происходят вблизи оси  $\tau$  и значения  $\rho(\tau)$  приближаются к нулю. Наличие значительных участков отрицательных значений  $\rho(\tau)$  свидетельствует о колебательном характере случайного процесса, представленного данной реализацией. Отрицательные значения  $\rho(\tau)$  получаются только при разных знаках сомножителей  $y_i$  и  $y_{i+\tau}$ , а это может иметь место при колебаниях.

В тесной связи с корреляционной функцией находится функция спектральной плотности  $S(\omega)$ , которая описывает распределение дисперсии случайной величины по частотам. Спектральная плотность несет дополнительную информацию о частотном составе корреляционной функции. На рис.2.б представлена обобщенная по 16 выборкам спектрограмма. Спектрограмма имеет доминирующие значения для периодов  $T_1$ - $T_5$  и «белый шум». К последнему относятся все гармоники, что ниже уровня  $S(\omega)=0,004$ . Таким образом, спектральная плотность дает исчерпывающую информацию о частотном составе рассеяния размеров, что очень

важно для анализа суммарного действия случайных факторов при механической обработке.

### 3. Классификация погрешностей механической обработки

С учетом вышесказанного разработана классификация погрешностей механической обработки (табл.1), которая позволяет решать основные задачи анализа, синтеза и экспериментального исследования ТС с переменными параметрами как при детерминированных, так и при случайных взаимодействиях.

Как известно, параметрические возмущения могут быть как периодическими, так и непериодическими. Очень часто при исследовании динамических процессов приходится сталкиваться с анализом возможных воздействий, природа которых нам полностью не ясна. Эти воздействия могут вызываться как внешними неконтролируемыми возмущениями, так и неконтролируемыми изменениями геометрии и параметров системы.

Процессы, описывающие детерминированные явления, могут быть периодическими или непериодическими. В свою очередь, периодические процессы можно разделить на гармонические и полигармонические. К непериодическим относятся почти периодические и переходные процессы.

Гармонические процессы описываются временной функцией

$$x(t) = X \sin(2\pi\omega t + \varphi_0)$$

где  $X$  – амплитуда;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $\omega$  – циклическая частота.

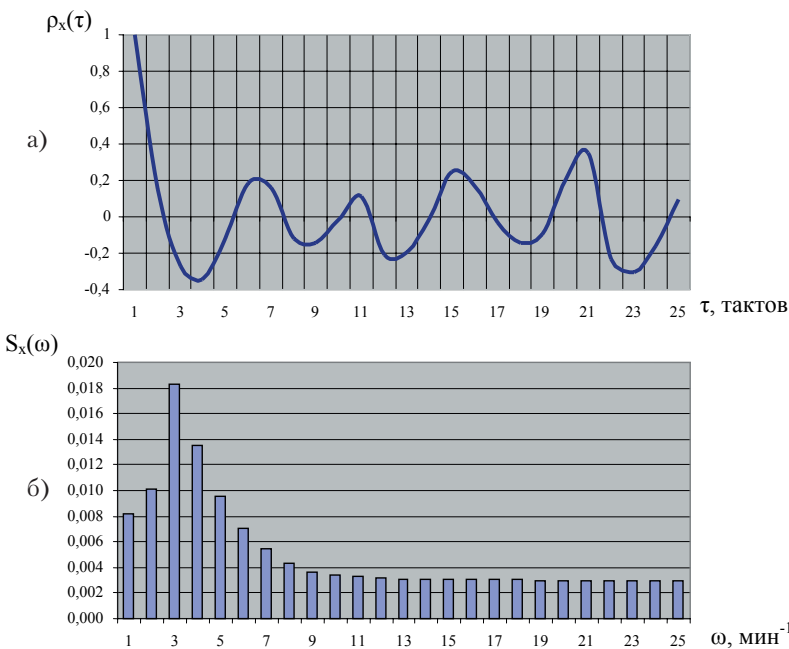
Можно привести много примеров физических явлений, которые с достаточным для практики приближением описываются гармоническими процессами. К их числу относятся колебания частоты вращения шпинделя, вибрации станка на холостом ходу и другие явления. С точки зрения анализа гармонические процессы представляют собой одну из простейших форм функции времени.

К полигармоническим относятся такие типы случайных процессов, которые могут быть описаны функцией времени, точно повторяющей свои значения через одинаковые интервалы. За некоторыми исключениями, полигармонические процессы могут быть представлены рядом Фурье

$$\zeta(\tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n\omega\tau + b_n \sin 2\pi n\omega\tau),$$

где  $\omega = \frac{1}{T_p}$  – частота;  $T_p$  – период процесса.

Физические явления, которым соответствуют полигармонические процессы, встречаются гораздо чаще явлений, описываемых чистой гармонической функцией. В действительности, когда тот или иной процесс относят к типу гармонических, то зачастую при этом имеют в виду только его приближенное



**Рисунок 2.** Спектральный анализ рассеяния размеров при токарной обработке: а – коррелограмма процесса; б – спектрограмма частотного состава точечной диаграммы.

представление, хотя на самом деле он является полигармоническим. Например, при тщательном исследовании профилограмм волнистости поверхности можно обнаружить небольшие колебания с частотами высших гармоник. В других случаях в периодическом физическом процессе могут присутствовать гармонические компоненты с относительно большими амплитудами. Например, вибрации агрегатного станка, работающего несколькими инструментами, содержат обычно интенсивную гармоническую компоненту. К случайным полигармоническим процессам, как будет показано далее, относятся также рассеяние величин действительных размеров при механической обработке и профилограммы микронеровностей обработанных поверхностей.

Почти периодические процессы можно описать рядом гармонических колебаний, частоты которых соизмеримы. Почти периодические процессы описываются функцией времени

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(2\pi\omega_n t + \varphi_n)$$

Физические явления, которым соответствуют почти периодические процессы, встречаются довольно часто при суммировании двух и более независимых гармонических процессов. Ярким примером почти периодического явления может служить вибрация оборудования в цехе, работающего в асинхронном режиме.

К переходным неперiodическим процессам относятся все неперiodические процессы, не являющиеся почти периодическими процессами. Другими словами, переходные процессы включают в себя все, не рассмотренные ранее процессы, которые могут быть описаны подходящими функциями времени. Физические явления, которым соответствуют переходные процессы, весьма многочисленны и разнообразны. Например, процесс износа режущего инструмента, свободные колебания инерционной механической системы после прекращения действия вынуждающей силы, изменение усилия на механизмы станка после прекращения резания. Важное отличие переходных процессов от периодических и почти периодических состоит в том, что их невозможно представить с помощью дискретного спектра. Однако в большинстве случаев получают непрерывное спектральное представление переходных процессов, используя интеграл Фурье

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi i \omega t} dt$$

Процессы, соответствующие случайным физическим явлениям, нельзя описать точными математическими соотношениями, поскольку результат каждого наблюдения над процессом невоспроизводим.

В подавляющем большинстве практических задач технологии машиностроения приходится исследовать случайные процессы, которые представляют собой смесь детерминированных процессов (линейных и полигармонических) и различных некоррелированных процессов. Структура, отдельные параметры, а в общем случае и физическая природа обоих процессов могут быть различными и зависеть от вида технологического процесса, технологического оснащения, режимов обработки и т.д. Вместе с тем, при исследовании технологических процессов существует наиболее характерная

задача – задача анализа детерминированных процессов в присутствии аддитивного флуктуационного гауссовского шума (обобщенного действия некоррелированных процессов).

Из таблицы 1 видно, что факторы, определяющие качество механической обработки (точность, шероховатость, волнистость), имеют полигармоническую природу. Это значит, что они не являются строго случайными и подлежат прогнозированию. Данное положение целесообразно использовать при разработке систем управления качеством механической обработки.

Особенность имитационного подхода, предлагаемого автором, заключается, прежде всего, в выборе объекта моделирования, в качестве которого принимается не собственно технологический процесс, а процесс управления им.

Постановка задачи имитационного управления по своей сути мало чем отличается от классических постановок. Требуется из некоторого начального состояния  $X_0$  путем синтеза управления  $u(\tau)$  перевести систему в конечное состояние  $X_k$  так, чтобы удовлетворить требованиям заранее установленного критерия качества (в нашем случае уменьшение поля рассеяния). Для решения поставленной задачи, а также последующего построения системы управления необходимо иметь дифференциальное уравнение рассеяния размеров во времени.

Технологический процесс механической обработки является слабо формализуемой системой вследствие действия большого количества случайных факторов. Поэтому до сих пор не были получены дифференциальные уравнения, описывающие изменение размеров во времени. Это объясняется применением онтологического подхода, когда составляются системы уравнений из отдельно рассматриваемых факторов, влияющих на точность обработки.

Если же рассматривать рассеяние размеров как результат действия технологической системы (с феноменологических позиций), ее поведение хорошо вписывается в теорию возмущений. В частности, уравнение Дюффинга [2] позволяет описывать системы, подвергающиеся многократному возбуждению

$$\ddot{u} + u + 2\epsilon\mu\dot{u} + \epsilon u^2 = F_1 \cos\omega_1\tau + F_2 \cos(\omega_2\tau + \varphi) \quad (1)$$

Здесь правая часть уравнения содержит амплитуды ( $F_1$  и  $F_2$ ), частоты ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ), а также фазовый сдвиг  $\varphi$  скрытых периодичностей. Левая часть характеризует величину отклонения  $u$  системы от прямолинейного движения. Коэффициенты,  $\epsilon$  и  $\mu$  характеризуют, соответственно, степень нелинейности системы и устойчивости системы СПИД к внешним воздействиям.

То, что уравнение (1) учитывает только двухчастотное возбуждение, объясняется возрастающими в геометрической пропорции объемами вычислений при учете большего количества частот.

Коэффициенты  $\epsilon$  и  $\mu$  индивидуальны для каждого станка и изменяются по мере его износа.

При решении уравнения (1) параметры  $F_p$ ,  $\omega_p$ ,  $\varphi_p$  определяются экспериментальным путем с помощью спектрального анализа. Дальнейшее решение является функцией независимой переменной  $\tau$  и параметров  $\epsilon$  и  $\mu$ , т.е.  $u = f(\tau, \epsilon, \mu)$ . Зная предполагаемое отклонение параметра  $u$ , можно внести соответствующую корректировку в положение режущего инструмента.

#### 4. Выводы

Предложенный алгоритм имитационного прогнозирования качества механической обработки призван повысить эффективность управления плохо определенными технологическими процессами либо в автоматизированном режиме (когда оператор не исключается из цепи управления и рекомендации имитационной системы учитываются им при формировании управленческих решений), либо в автоматическом режиме.

Построенная полигармоническая модель качества механической обработки позволяет подробно анализировать поведение технологической системы и в особенности ее эволюцию во времени. Она соответствует всем свойствам системы, имеет теоретическую ценность и может быть использована для имитационного моделирования процесса формирования качественных характеристик обрабатываемых поверхностей.

Таблица 1.

Классы процессов, присущих механической обработке

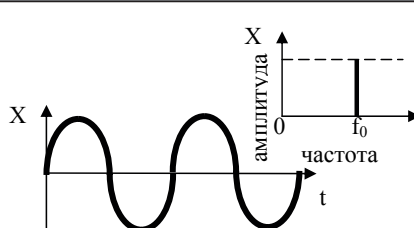
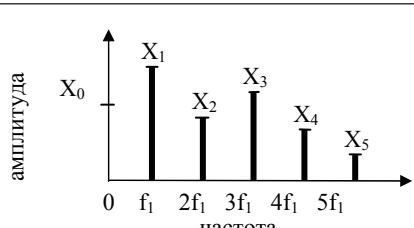
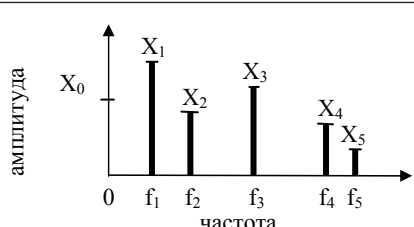
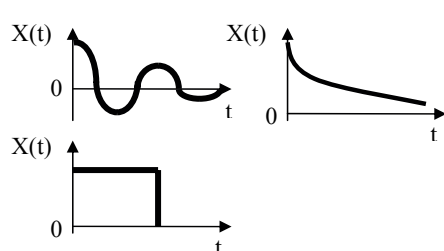
Класс	Подкласс	Вид	Вид описывающей функции	Факторы
Детерминированные	Периодические	Гармонические	 $x(t) = X \sin(2\pi\omega t + \varphi)$	Колебания частоты вращения шпинделя; Вибрации станка на холостом ходу
		Полигармонические	 $x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi\omega t + b_n \sin 2\pi\omega t)$	Вибрации оборудования во время обработки; Рассеяние размеров; Шероховатость обработанных поверхностей; Волнистость
	Непериодические	Почти периодические	 $x(t) = X \sin(2t + \varphi_1) + X_2 \sin(3t + \varphi_2) + \dots$	Вибрации оборудования, работающего в асинхронном режиме, в цехе
		Переходные	 $x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi j\omega t} dt$	Износ режущего инструмента; Свободные колебания инерционной механической части механической системы после прекращения действия вынуждающей силы; Изменение усилия на механизмы станка после прекращения резания

Таблица 1. Продолжение

Класс	Подкласс	Вид	Вид описывающей функции	Факторы
Случайные	Стационарные	Эргодические		Неравномерность припуска; Неоднородность обрабатываемого материала
		Не эргодические		
Нестационарные	Частные случаи			Погрешность базирования

Литература

1. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. //Математика сегодня. – М.: Знание, 1974. – С.5-49.
2. Найфэ А. Введение в методы возмущений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 535с.



**Гордеев Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Украинской инженерно-педагогической академии.

Круг научных интересов: Синтез систем управления качеством в машиностроении, имитационное моделирование технологических систем.  
 Контактный телефон: +38 (0572) 20-63-13, (057) 772-04-54