

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ

Представлена методология научного исследования технологической системы шлифования на примере профильного зубошлифования методом копирования на станках с ЧПУ на основе представления технологической системы в терминах входа, состояния и выхода. Дана характеристика объекта и предмета исследования, методов моделирования, оптимизации и управления на этапах производства и его технологической подготовки. Отмечены особенности технологического анализа на основе теоретико-вероятностного и частотного подходов.

Ключевые слова: зубошлифование, анализ и синтез, объект и предмет исследования, моделирование, оптимизация, управление, мониторинг, технологическая диагностика.

Методология научного исследования предопределяет эффективность получения новых знаний и новые возможности управления технологическим процессом и операциями. Однако в имеющейся литературе недостаточно систематизированных сведений о методах исследования технологических систем машиностроительного производства. Имеющиеся сведения [1] не сопровождаются примерами их практического применения применительно к технологическим системам (ТС) шлифования, в частности профильного зубошлифования на станках с ЧПУ.

1. Методология исследования технологической системы шлифования (как объекта управления) Научное исследование - теория и эксперимент – содержит два этапа принятия решений: анализ (качественный, количественный) и синтез (на основе результатов анализа). На первом этапе выполняют анализ объекта и предмета исследования. На втором этапе разрабатывают системы-конструкции и системы-процессы, позволяющие достичь цели исследования. Данное исследование технологической системы основано на использовании трёх методологических направлений: моделирование, оптимизация и управление (рис 1).

Моделирование позволяет заменить сложные явления (геометрические, теплوفизические, динамические и другие) на соответствующие модели (modelling) и исследовать на моделях (simulation) эти явления, в том числе на этапах анализа и синтеза технологической системы шлифования. В свою очередь имеющееся в литературе разнообразие моделей можно разделить по двум основным видам: физические модели и математические. Физические модели, например, процессы-аналоги и компьютерно-графические модели, позволяют целенаправленно исследовать отдельные свойства сложных процессов при устранении влияния на них возмущающих факторов. Например, физическое моделирование процесса профильного зубошлифования процессами-аналогами – плоским или круглым прямоугольным шлифованием – позволяет установить влияние режимов профильного прямоугольного шлифования на качество поверхности и поверхностного слоя. Замена реального объекта – зубчатого колеса (ЗК) на его компьютерно-графическую модель позволяет установить влияние погрешности базирования на распределение припуска перед обработкой и изменение накопленной погрешности шага ЗК после обработки.

Оптимизация позволяет выбрать лучшее решение из возможных вариантов по какому-либо критерию: техническому, временному или финансовому. Этот критерий при моделировании называют целевой функцией. Например, выбор оптимального числа измерений припуска на этапе наладки зубошлифовального станка (перед обработкой) может быть осуществлен исходя из наименьшей погрешности определения экстремальных значений припуска (технический критерий).

Управление позволяет обеспечить целесообразное функционирование процесса, исходя из обеспечения требуемых технологических параметров. Управление осуществляется в двух формах: прямое и косвенное. Прямое управление включает контроль и регулирование, косвенное – мониторинг параметров состояния и/или технологическую диагностику процесса на основе измерения параметров состояния процесса или точностных параметров обработанной детали. Например, диагностика состояния процесса по теплонпряженности позволяет предотвратить шлифовочные дефекты.



Рис. 1. Структурная схема научного исследования ТС шлифования

2. Оптимизация как метод проектирования и управления. Оптимизация в технике (engineering optimization) – быстро развивающаяся область науки, вытекающая из математической теории оптимизации технических систем: конструкций и процессов. Под теорией оптимизации понимают совокупность фундаментальных математических приёмов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов [2]. Процесс оптимизации лежит в основе всякой инженерной деятельности, поскольку классические функции инженера заключаются в том, чтобы, с одной стороны, проектировать новые более эффективные и менее дорогостоящие технические системы и, с другой стороны, разрабатывать методы повышения качества функционирования существующих систем. Традиционная постановка задачи оптимизации включает ряд этапов: установление границ технической системы, определение количественного критерия для сравнительного анализа вариантов, выбор внутрисистемных переменных для определения характеристик и идентификации вариантов, построение модели процесса для его оптимизации, отражающей взаимосвязи между переменными. Корректная постановка задачи является необходимым условием успешного завершения оптимизационного исследования и «ассоциируется в большей степени с искусством, нежели с точной наукой» [2].

Оптимизация производится методами качественного (хорошо, плохо) и количественного анализа (целевая функция, квалиметрия). Качественный анализ позволяет сформировать структуру ТС для последующего количественного анализа. Этот анализ позволяет обосновать объект и предмет оптимизации. Количественный анализ позволяет оценить сравнительную эффективность технического решения. Это справедливо и для структурной, и для параметрической оптимизации (рис.1). В первом случае, оптимальное решение выбирают из ограниченного количества дискретных вариантов, а во втором случае – из неограниченного количества значений переменной величины, которую изменяют с шагом, зависящим от допустимой погрешности модели оптимизации.

Известно, что оптимизация является общим руководством к научному исследованию, направленному на поиск наиболее выгодного варианта из числа возможных альтернатив [3]. Причем это руководство применяют как метод принятия решений при проектировании технических систем (конструкций и процессов) и при управлении, направленном на поддержание максимальной эффективности функционирующих систем.

Применение методов оптимизации возможно для этапов подготовки производства (оптимизация как метод проектирования) и собственно производства (оптимизация как метод управления). В обоих случаях оптимизацию производят на двух уровнях иерархии: структурном и параметрическом [1,3,4]. Оптимизация как метод проектирования рассматривается в двух категориях: структурная оптимизация связана с выбором состава ТС,

параметрическая – с перебором количественно изменяемых параметров, например режимных параметров зубошлифования. Для выполнения структурной оптимизации формируют возможные компоновки (layouts) ТС, подлежащие оценке и сравнению по выбранному критерию. Приобретаемое у фирмы-поставщика технологическое оборудование с ЧПУ представляет собой целесообразную совокупность элементов технологической системы: станок, инструмент, СОЖ, система ЧПУ, измерительная система. Все эти элементы необходимы для осуществления технологической операции, например операции зубошлифования. По сути это результат структурной оптимизации, которую выполнила фирма-разработчик соответствующей ТС. С течением времени на этапе эксплуатации ТС происходит изменение её исходных элементов. Например, замена шлифовальных кругов на более эффективные высокопористые круги [5]. Ограниченное количество в действующем производстве высокотехнологичного оборудования при большой программе выпуска ЗК приводит к необходимости параллельного использования станков с ЧПУ и более дешевых отечественных станков с цикловым управлением без встроенной измерительной системы. Это приводит к появлению новых вариантов многостаночных ТС, зависящих от условий производства.

На примере зубошлифования методом копирования на станке с ЧПУ типа HOFLER RAPID 1250 возможны следующие варианты технико-технологического обеспечения производства ЗК.

1. Полностью автоматизированный цикл обработки на станке HOFLER RAPID 1250 включающий измерение припуска на этапе наладки, выравнивание припуска для уменьшения его неравномерности, зубошлифование с учётом индивидуального распределения припуска, измерение обработанной детали и оценка полученной точности ЗК.

2. Измерение припуска по боковым сторонам впадин зубчатого колеса на станке с ЧПУ типа HOFLER RAPID 1250, оценка неравномерности припуска, поиск и фиксация на заготовке наладочной впадины, с которой начинают цикл шлифования на другом станке, например, станке с цикловым управлением (без ЧПУ и встроенной измерительной системы).

3. Применение принципа групповой технологии, в соответствии с которым производят классификацию обрабатываемых деталей по типоразмерам и распределение их по оборудованию, исходя из минимального количества вариантов.

4. Технологическая система зубошлифования, работающая при разных характеристиках и наладках абразивного инструмента (прерывистые, высокопористые абразивные круги, многопрофильные наладки, собранные из шлифовальных кругов). Замена характеристики абразивного инструмента приводит к дополнительным исследованиям, связанных с оптимизацией режимов шлифования на основе мониторинга процесса и его технологической диагностики.

5. Быстрая переналадка станка с ЧПУ, работающего в условиях мелкосерийного и единичного производства, на основе перезагрузки управляющей программы и адаптивного цикла измерения припуска перед обработкой с последующим использованием режима вариабельности при зубошлифовании.

Параметрическая оптимизация с использованием индивидуальных особенностей ЗК заключается в поиске оптимальных значений параметров, имеющих возможность количественного изменения, например, параметров режимов резания. Эти параметры могут принадлежать к непрерывному (глубина резания) или дискретному (номер обрабатываемой впадины) изменяющемуся ряду значений.

В соответствии с общей методологией оптимизации выбирают переменные и область их возможного изменения, затем формируют математическую модель оптимизации, в которой отражены как минимум две или сводящиеся к двум тенденции. Далее применяют математические приемы решения задачи оптимизации (раздел математики) для поиска оптимального решения.

Таким образом, внимание необходимо уделить поиску альтернативных структур ТС и их оценке на этапе производства (оптимизация как метод управления). Применительно к зубошлифованию это означает разработку и анализ структуры операции на станке с ЧПУ на этапах наладки и обработки при разных способах определения припуска на зубошлифование. Это вызвано тем, что припуск на зубошлифование зависит от способа наладки станка по результатам его первичного измерения [6]. При уменьшении числа измерений припуска возрастает его неопределенность (uncertainty), которую компенсируют отводом шлифовального круга от заготовки ЗК. Это приводит к увеличению числа рабочих ходов и снижению производительности обработки. Увеличение числа измерений припуска на этапе наладки

станка устраняет этот недостаток, однако при этом время операции увеличивается на величину времени измерения. При разработке разных способов определения припуска перед обработкой возникают варианты структурных компоновок ТС, и оптимизация операции является методом повышения эффективности управления станком, т.е. является методом управления (в отличие от метода проектирования).

Таким образом, методология оптимизации как метода управления процессом зубошлифования включает следующие этапы:

- 1) формирование структуры операции, исходя из предварительно сформулированного критерия или подхода;
- 2) определение режимов и трудоемкости для каждой структуры операции, исходя из разработанных математических моделей процесса и параметрической оптимизации;
- 3) сравнение различных структур операции с помощью соответствующих оценочных функций (оценка технического уровня, оценка технического состояния).

3. Исследование технологической системы профильного зубошлифования. Теория технических систем охватывает системы-конструкции и системы-процессы. Причём системы-конструкции предназначены для реализации систем-процессов. В этом смысле ТС механической обработки, например, шлифования, является системой-конструкцией, которую собирает технолог для реализации системы-процесса, например, процесса профильного зубошлифования. В соответствии с теорией технических систем одним из важных начальных этапов разработки систем является их адекватное описание (description) и моделирование (simulation), которые могут быть представлены в соответствующих форматах: словесное описание (текст) на обычных языках, специальные знаковые системы (языки программирования), блок-схемы, графы, математическая модель, временная диаграмма, комбинированный способ и т.п. Выбор соответствующего способа описания и моделирования зависит от цели исследования. Если такой целью является создание условий, обеспечивающих требуемое протекание процесса, т.е. выполнение необходимого алгоритма функционирования, то говорят об управлении процессом [7] и соответствующем алгоритме управления. В этом случае разрабатываемую техническую систему представляют в виде модели системы управления, имеющей вход, состояние и выход. При таком моделировании ТС – это математическая абстракция, принимаемая в качестве модели динамического явления [8], которая представляет это динамическое явление в терминах математических отношений. Модель системы управления характеризуют её входом, состоянием и выходом.

Вход представляет собой внешние «силы» в виде множества временных функций, действующих на динамическое явление (процесс). Состояние и выход представляют собой меры непосредственно наблюдаемого поведения этого явления (процесса). Зависимость между входом и выходом может быть сильной или слабой. Базовой характеристикой любого динамического явления является поведение системы, на котором в любой момент времени отражаются не только текущие приложенные силы (входные параметры), но также те из них, которые были приложены в прошлом по отношению к данному моменту времени. В этом смысле динамическое явление обладает памятью, в которой сохраняется влияние прошлых приложенных сил (параметров). При разработке модели указанное состояние системы представляет собой векторную функцию времени. Знание состояния системы в любой момент времени t_0 и знание указанных входных параметров достаточно, чтобы определить выход и состояние системы в любой момент времени $t \geq t_0$, т.е. начиная с момента t_0 . Обобщённые отношения между входом, состоянием и выходом абстрактной кибернетической системы можно показать в виде схемы (рис.2).

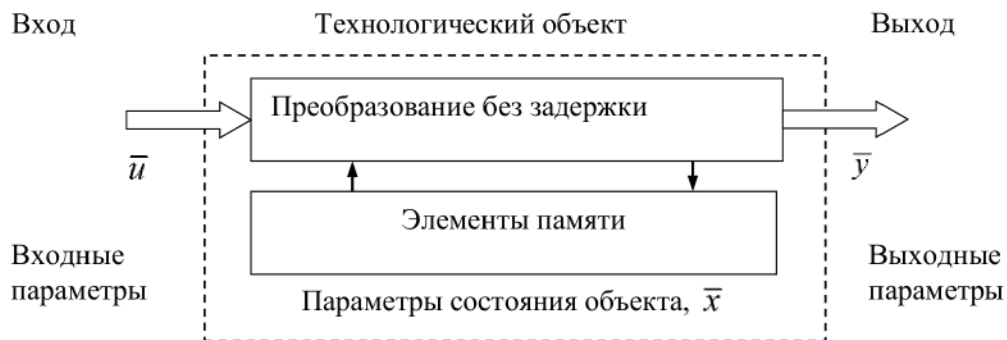


Рис. 2. Концептуальное представление ТС на основе модели «вход-состояние-выход» (возмущения не показаны) [8]

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

В общем случае вход \bar{u} , состояние \bar{x} и выход \bar{y} системы являются векторными функциями времени, имеющими соответствующую размерность. Зависимость указанных функций от времени предполагает потенциальную возможность использования частотного подхода к исследованию системы.

Для всех указанных явлений (физических и иных) справедливы следующие принципы теории систем: физической реализуемости, детерминированности (определённости), стохастичности [8]. Первый принцип (non-anticipation principle) означает, что состояние и выход системы в любой момент времени t_0 может быть функцией только тех входных величин, которые имели место при $t < t_0$. Второй принцип характеризует детерминированную систему (deterministic system) у которой состояние и выход могут быть определены с уверенностью на основе полного знания её состояния в момент времени t_0 (необходимое условие) и знания входа $\bar{u}(t)$ на интервале времени $t \geq t_0$ (достаточное условие). Третий принцип определяет стохастическую систему (stochastic or nondeterministic system). Для стохастической системы указанное знание о состоянии и входе является достаточным только чтобы обеспечить статистическое описание (statistical description) состояния и выхода системы в момент времени t . Указанная особенность автоматизированных ТС предполагает использование теоретико-вероятностного подхода для их исследования, что предполагает статистическое описание параметров системы (наряду с детерминированным описанием).

Современные исследования ТС шлифования на станках с ЧПУ выполняют по различным направлениям, в зависимости от предмета исследования. Когда объектом исследования является процесс в технологической системе, то предметом исследования могут быть разные его свойства, начиная от методов формообразования (например, профильное зубошлифование или зубошлифование червячным кругом), выбора элементов технологической системы, и заканчивая разработкой мониторинга процесса [9], его технологической диагностикой и адаптивным управлением [10].

Процесс шлифования при моделировании представляют в качестве звена системы управления [5], которая может быть разомкнутой (без обратной связи) или замкнутой (с обратной связью). На основании такого моделирования технологическая система шлифования может быть представлена в виде интегрированного взаимодействия двух видов технических систем: системы-конструкции и системы-процесса (рис.2). Выходные параметры технологической системы (результат её функционирования) вытекают из принципа целеполагания, который в свою очередь определяется функциональным назначением изготавливаемой детали. Это нашло отражение в современной функционально-ориентированной технологии производства ЗК. Обычно выходными параметрами технологической системы являются численные значения параметров точности обработки и качества обработанной поверхности и поверхностного слоя. Например, применительно к процессу профильного зубошлифования (рис.3) к числу точностных параметров относятся следующие: форма профиля, угол профиля, форма линии зуба, угол наклона зуба, шаг зубьев, радиальное биение и другие. Эти параметры при зубошлифовании на станке с ЧПУ оценивают с помощью встроенной измерительной системы тактильного (tactile) типа, например, измерительной системы Renishaw (рис.4).

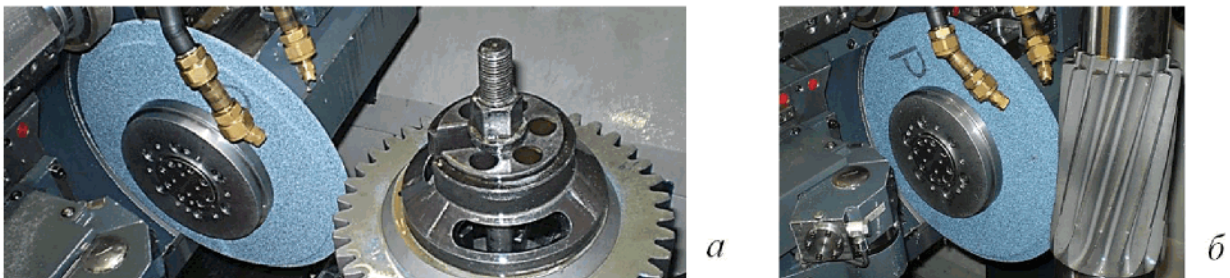


Рис. 3. Технологическая система профильного зубошлифования при обработке зубчатого колеса (а) и вала-шестерни (б) на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250

На станках с ЧПУ имеется следящая система мониторинга параметров состояния технологической системы [9], которая является элементом технологической диагностики и предназначена для поддержания стабильности функционирования ТС (рис.5).

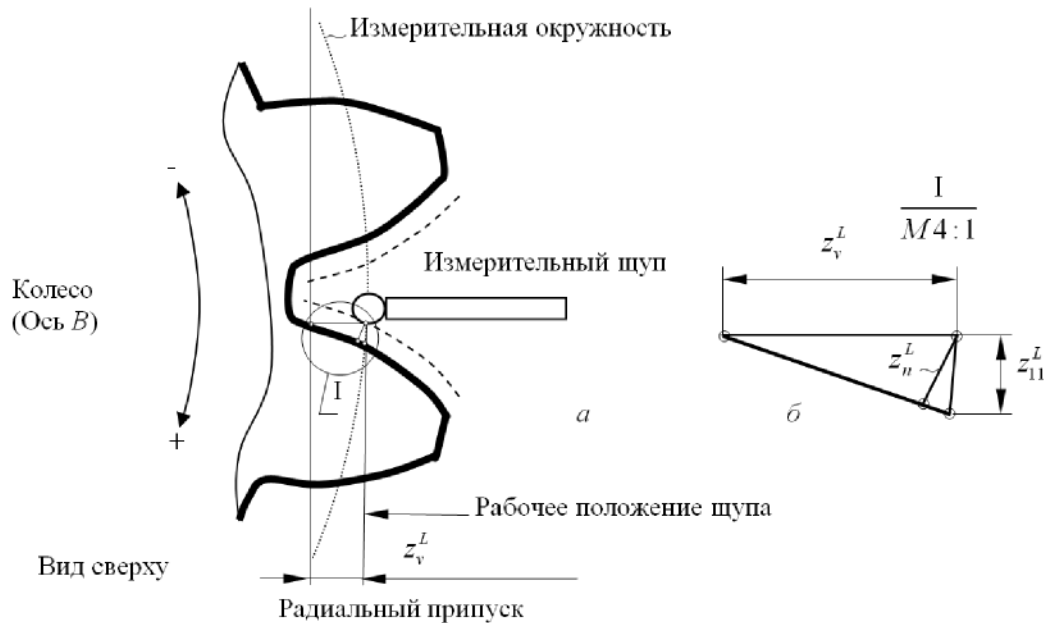


Рис. 4. Измерение припуска перед зубошлифованием контактным щупом компании Renishaw (а) и составляющие припуска (б): z_v^L , z_n^L – припуски при вертикальном и нормальном исчислении; z_{11}^L – припуск при исчислении по измерительной окружности

Например, при профильном зубошлифовании к числу параметров состояния можно отнести следующие: Q'_w , V'_w , F , T , $AЭ$. Здесь Q'_w (specific material removal rate) и V'_w (specific material removal) – удельные параметры съёма припуска; T , F – температурный (temperature) и силовой (force) параметры процесса; $AЭ$ – параметр акустической эмиссии (acoustic emission). Некоторые из указанных параметров используются для мониторинга процесса профильного зубошлифования на станке с ЧПУ HOFLEER RAPID 1250: Q'_w , V'_w , $AЭ$. Вместо параметров F и T на этом станке имеется выведенный на монитор сигнал мощности привода шлифовального круга, который представлен для визуального наблюдения цифровым или аналоговым индикатором уровня. Можно выполнить преобразование этого сигнала в соответствующий сигнал теплонапряженности процесса.

Следует отметить, что рассмотренная кибернетическая модель автоматизированной технологической системы (рис.5) соответствует принципу информационного обеспечения производственного процесса, высказанному профессором И.М. Колесовым: "До сих пор технология машиностроения в очень малой мере занималась изучением информационных процессов на производстве. Для восполнения пробела в этом направлении требуется большая научная работа, которая должна быть направлена на разработку метода описания производственных и технологических задач с точки зрения информационного процесса, на выработку языка описания, согласующегося с машинным языком, на разработку алгоритмов и программ для управления решением типовых задач" [11].

4. Теоретико-вероятностный и частотный подходы в технологическом анализе

Технология машиностроения относится к числу наук о процессах (process science), обеспечивающих требуемый технологический результат: количество и качество продукции, сроки изготовления при наименьшей трудоёмкости и себестоимости. Объектом этой науки является разработка и обеспечение технологического процесса изготовления машиностроительной продукции, состоящего из операций обработки и сборки. Частью этих операций является процесс взаимодействия элементов технологической системы «станок-приспособление-инструмент-заготовка», который определяет затраты основного (машинного) времени.

Технологический анализ, как метод научного исследования в технологии машиностроения, обычно выполняют на этапах производства и его подготовки (технологическая подготовка производства), которые являются этапами жизненного цикла изделия. На обоих этих этапах используется оптимизация, которая является, соответственно, методом управления (этап производства) и методом проектирования (этап подготовки производства). Как правило, количественный технологический анализ основан на математическом аппарате инженерной физики по таким её составляющим как кинематика,

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

теплофизика и динамика, которые, в этой связи называют технологическими: технологические кинематика, теплофизика и динамика. Эти технологические направления соответствуют природе явлений, происходящих при механической обработке – движение, тепловой и силовой факторы – и являются научными основами обеспечения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения.



Рис. 5. Кибернетическая модель автоматизированной технологической системы шлифования: в дробных обозначениях режимных параметров указаны зарубежные [9] и отечественные обозначения

ПЕРСПЕКТИВНИ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Технологии машиностроения как науке о процессах соответствуют два общенаучных подхода: теоретико-вероятностный [12] и частотный [13]. В соответствии с теоретико-вероятностным подходом любой параметр процесса, преобразованный в информационный сигнал, является комбинацией двух компонент: систематической (детерминированной, регулярной) и случайной (стохастической). Поскольку параметры реального процесса редко могут быть детерминированными, то в этом смысле детерминированная величина может описывать некий абстрактный, виртуальный, реально не существующий процесс. Выводы, которые можно извлечь из моделирования детерминированного процесса могут оказаться полезными для практики, если они касаются, не абсолютной величины, а каких-либо выявленных тенденций (тренд, поведение). Случайная величина также имеет место в технологическом анализе, например, при оценке и моделировании неровностей обработанной поверхности (шероховатость, волнистость, отклонения формы), распределении припуска по зубьям ЗК, при анализе вибраций в упругой системе металлорежущего станка, оценке погрешности эксперимента и/или измерения [14]. Имеется соответствующий математический аппарат теории случайных процессов, который используют для принятия технологических решений. В этом случае рассматриваемые технологические параметры (параметры шероховатости, припуск на обработку и т.п.) являются статистическими (не детерминированными) и, следовательно, определяются соответствующими законами распределения случайной величины (распределения Гаусса, Стьюдента и т.п.), имеют среднее значение и доверительный интервал.

Как правило, в технологических исследованиях чаще имеет место композиция двух составляющих процесса: систематической (детерминированной) составляющей, которая определяет тренд, и случайной, наложенной на этот тренд. Основные технологические закономерности проявляются в изменении детерминированной составляющей (например, при многофакторном планировании эксперимента), а случайная составляющая является при этом «шумовой» и характеризует надежность оценки устанавливаемой закономерности. По этой причине теоретико-вероятностный подход по своей сути и математическому аппарату соответствует природе реального технологического процесса (операции), в том числе на настроенных станках в серийном производстве и на станках с ЧПУ в мелкосерийном и единичном производстве.

Соответствие частотного подхода природе технологических процессов механической обработки, т.е. первичному изменению технологических параметров во времени, следует из сущности интегрального преобразования Фурье, предназначенного для трансформации временных параметров процесса в частотные параметры (прямое преобразование Фурье) и обратно из частотных параметров во временные параметры (обратное преобразование Фурье). Частотное представление технологических параметров в виде соответствующих сигналов позволяет принимать эффективные технологические решения путем внесения соответствующих корректив в передаточные функции ТС. Например, коррективы в режимы резания могут быть внесены для обеспечения устойчивой работы ТС, т.е. для вывода её из неустойчивого состояния. Другим примером эффективности частотного подхода является разделение спектра неровностей обработанной поверхности на частотные составляющие, которые соответствуют категориям шероховатости, волнистости и отклонениям формы профиля. Эту математическую операцию производят с помощью цифровых фильтров, в том числе фазокорректирующих или по специальному алгоритму [14].

Положительным качеством рассматриваемой методологии двух подходов (теоретико-вероятностного и частотного) является естественное взаимодействие этих подходов, поскольку результаты теоретико-вероятностного моделирования (математического описания) технологических параметров и результаты их экспериментального измерения могут быть подвергнуты частотному преобразованию Фурье. При этом возможны следующие случаи: систематическая составляющая сигнала превалирует над случайной составляющей сигнала или не превалирует. В первом случае, говорят, например, о периодическом сигнале. В противном случае (случайная составляющая сигнала больше систематической составляющей) говорят об аперриодическом сигнале. Количественное соотношение между систематической и случайной составляющими выявляют с помощью автокорреляционной функции исходного сигнала [15].

Практика технологических исследований подтверждает правомерность представления технологического сигнала в виде суммы систематической (периодической, полигармонической) и случайной (аперриодической) составляющих. Например, по этому принципу построены европейские (ISO) или американские (ANSI, ASME) стандарты по шероховатости и волнистости поверхности. Такой принцип позволяет, например, установить взаимосвязь между

периодическими сигналами вибраций и волнистостью обработанной поверхности. В общем случае теоретико-вероятностный подход или отнесение изучаемой ТС к типу детерминированно-стохастической является научной гипотезой до сих пор не опровергнутой технологической практикой.

Для временных сигналов с превалирующей систематической составляющей их частотное представление по Фурье имеет вид дискретного спектра, т.е. каждой явно выраженной амплитуде гармоники соответствует определенная частота. Поэтому, обратное преобразование Фурье может быть выполнено путём суперпозиции соответствующих явно выраженных и дискретных гармонических составляющих. Амплитуду этих составляющих берут из амплитудно-частотной характеристики сигнала, а фазу – из его фазочастотной характеристики.

Особенностью технологических исследований является ограниченный временной интервал наблюдения сигнала, характеризующего технологический параметр. Например, запись вибраций в упругой системе металлорежущего станка производят на дискретных, ограниченных интервалах времени длительностью 0,2с. при частоте дискретизации исходного временного сигнала 30 кГц. Этот незначительный по длительности временной интервал (0,2с.) преобразуют в соответствующий спектр сигнала и наблюдают за изменением частотных компонент сигнала во времени. При этом текущее время складывается из суммы интервалов длительностью 0,2с. При измерении припуска на отдельных впадинах ЗК весь интервал изменения припуска характеризуется длиной измерительной окружности $2\pi R$ (рис.4), где R – радиус измерительной окружности заготовки. Ещё одним примером ограниченности длины временного интервала наблюдения является длина трассирования при измерении щупом параметров качества поверхности. Ограниченность указанного интервала наблюдения приводит к нескольким сложностям применения указанных методологических подходов. Во-первых, представление любой временной периодической функции в виде дискретного спектра, т.е. в виде ряда Фурье, возможно, если указанная функция существует на бесконечном интервале времени. Всякое ограничение этого интервала по времени или координате, характеризующей время, нарушает требования бесконечности наблюдаемого процесса (периодического или аperiodического). Это приводит к невозможности гармонического представления сигнала в виде ряда Фурье (или дискретного частотного спектра). В этом случае преобразование Фурье выражают интегралом Фурье. Он даёт непрерывный спектр в функции частоты изменения сигнала. Аналогом амплитуды сигнала в спектре является спектральная плотность сигнала. Во-вторых, при ограниченном (по времени или координате) сигнале этот сигнал часто содержит постоянную составляющую (direct component), имеющую ту же самую ограниченную протяжённость по времени или координате. Из свойства линейности преобразования Фурье, следует, что выходной частотный спектр будет содержать спектральную часть от одиночного прямоугольного импульса, длина которого равна указанному отрезку координаты. Спектр этого сигнала является непрерывным и описывается специальной функцией $\text{sinc}(x)$. Этот спектр может превалировать над спектром переменной части сигнала, что может «свести на нет» результаты частотного анализа сигнала. В-третьих, задачей является выбор частоты дискретизации исходного сигнала, исходя из требуемого диапазона частот этого сигнала в его частотном представлении. Такая задача возникает при выборе оптимального числа измерений припуска на зубошлифование в отдельных (не всех) впадинах ЗК.

Выводы

1. Использование кибернетической модели технологической системы шлифования предполагает организацию и исследование процесса управления, который является согласующим процессом, сопровождающим процессы механической обработки (шлифование) и износа шлифовального круга исходя из предварительно сформулированных требований, указанных на чертеже обрабатываемой детали.

2. В зависимости от получаемого результата шлифования управляющие воздействия на объект (процесс зубошлифования) могут быть скорректированы или продолжены после окончания цикла обработки в зависимости от фактически получаемых результатов, что свидетельствует о наличии отрицательной обратной связи в системе управления процессом шлифования.

3. Классификация параметров технологической системы шлифования на входные, состояния и выходные предопределяет методологию научных исследований этой системы и принятые подходы к её исследованию и оптимизации. К числу таких подходов относятся следующие: кибернетический подход, системный, теоретико-вероятностный, частотный и

другие.

4. На современном этапе исследования технологической системы шлифования на станках с ЧПУ управление процессом является автоматизированным в том смысле, что решение о внесении соответствующих корректирующих воздействий принимает оператор, обслуживающий станок. Проявление кибернетического подхода к управлению процессом зубошлифования подтверждается встроенной в ЧПУ системой технологического мониторинга по указанным параметрам состояния технологической системы, в том числе по параметру акустической эмиссии (AE signal), который используют для управления циклом шлифования и правки шлифовального круга.

5. Прогресс в развитии автоматизации технологической системы шлифования приводит к разработке автоматизированной системы технологической диагностики (дальнейшее развитие мониторинга) и адаптивных систем не только по параметрам состояния технологической системы, но также по её выходным параметрам (точность обработки и качество поверхности).

6. Предложены методы обеспечения адекватного применения теоретико-вероятностного и частотного подходов в технологических исследованиях. Например, сформулированы требования по нормированию исходного сигнала технологического назначения.

7. Разработана методика для дискретного представления спектра, т.е. в виде ряда Фурье, при наличии ограниченного по времени или координате технологического сигнала. Методика заключается в n -кратном повторении сигнала, из которого предварительно устранена его постоянная составляющая.

8. Даны рекомендации по выбору частоты дискретизации исходного сигнала технологического назначения, исходя из требуемого диапазона частот при частотном представлении этого сигнала, например, сигнала, характеризующего припуск на зубошлифование и его распределение по впадинам зубчатого колеса.

Информационные источники

1. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): Навч. посібник / Б.О. Пальчевський. – Львів: Світ, 2001. – 232 с.
2. Реклейтис Г. Оптимізація в техніке: В двух книгах. Кн. 1. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэтсел. – М.: Мир, 1986. – 349 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.8. “Оптимизация технологических процессов в машиностроении”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 509 с.
4. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
5. Ларшин В.П. Профильное шлифование зубчатых колёс высокопористыми абразивными кругами / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко, В.В. Нежебовский, Г.В. Серeda // Оборудование и инструмент. – 2016. – №5 /190/. – С.20-23.
6. Лищенко Н.В. Оптимизация профильного зубошлифования на станке с ЧПУ и системой измерения припуска / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, В.В. Нежебовский // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2016. – Вип.1 (26) . – С.50-61.
7. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
8. Freeman Herbert. Discrete-time systems: an introduction to the theory / Herbert Freeman. – New York: J. Wiley, 1965. – 241 p.
9. Klocke Fritz. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping / Fritz Klocke. – Berlin: Springer, 2009. – 433 с.
10. Рыбалко А.П. Системы технологической диагностики и адаптивного управления для станков с ЧПУ / А.П. Рыбалко, Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – Вип.1 (25). – С. 94-108.
11. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1999. – 591 с.
12. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход), под ред. А.А. Первозванского / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
13. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с.
14. Лищенко Н.В. Спектральный анализ при измерении параметров шероховатости и волнистости фрезерованной поверхности / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, Ф.С. Сабиров. – //

Сучасні технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. – Вип.10 / редкол.: В.О. Федорович (голова) [та ін.] . – Харків: НТУ «ХП», 2015. – С.222-234.

15. Лищенко Н.В. Разделение профиля поверхности на систематическую и случайную составляющие / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. / редкол.: А.И. Грабченко (отв. ред) . – Харьков: НТУ «ХП», 2016. – Вип.86 . – С.62-73.

¹Ларшин В.П., д.т.н. ²Лищенко Н.В. к.т.н

¹Одеський національний політехнічний університет

²Одеська національна академія харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗУБОШЛІФУВАННЯ

Представлена методологія наукового дослідження технологічної системи шліфування на прикладі профільного зубошліфування методом копіювання на верстатах з ЧПК на основі подання технологічної системи в термінах входу, стану і виходу. Дана характеристика об'єкта і предмета дослідження, методів моделювання, оптимізації та управління на етапах виробництва і його технологічної підготовки. Відмічені особливості технологічного аналізу на основі теоретико-імовірнісного і частотного підходів.

Ключові слова: зубошліфування, аналіз і синтез, об'єкт і предмет дослідження, моделювання, оптимізація, управління, моніторинг, технологічна діагностика.

V. ¹Larshin, N. ²Lishchenko

¹Odessa National Polytechnic University

²Odessa National Academy of Food Technologies

GEAR GRINDING SYSTEM RESEARCH

The methodology of scientific research of the technological grinding system is presented using the example of profile grinding by copying method on CNC machines on the basis of the representation of the grinding system in terms of input, state and output. The characteristics of the object and the subject of research, methods of modeling, optimization and control at the production stages and its technological preparation are given. Features of technological analysis based on the theoretical-probabilistic and frequency approaches are noted.

Keywords: gear grinding, analysis and synthesis, object and subject of research, modelling, optimization, control, and monitoring, technological diagnostics.