

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие современного машиностроения характеризуется интенсификацией производственных процессов, связанной с естественным стремлением к повышению производительности и снижению себестоимости выпускаемых машин. Одновременно возрастают требования к качеству изделий. Под качеством изделий в целом в условиях товарного производства понимается «совокупность характерных особенностей формы, внешнего вида и условий эксплуатации, определяющих пригодность товара».

Возрастающие требования к качеству и надежности выпускаемой продукции, точности обработки и стойкости инструмента, а также появление новых видов труднообрабатываемых материалов, широкая механизация и автоматизация технологических процессов значительно повысили актуальность исследования динамических явлений при резании металлов.

Механическая обработка резанием является наиболее распространенным видом формообразования деталей из соответствующих заготовок. На основе деталей комплектуются сборочные единицы, узлы и машины в целом. Поэтому требования к качеству производимых машин соответствующим образом отображаются в показателях качества каждой обработанной детали, сборочной единицы и узла. Показатели качества, определяемые механической характеристикой изделия, отображаются в конструкторской документации и в технических условиях.

Применительно к механической обработке резанием устанавливаются требования относительно точности исполнения размеров и формы изделия, а также качества металла

поверхностного слоя, так как именно эти характеристики деталей и определяют, в основном, *надежность машин*, т.е. свойства выполнять и сохранять во времени требуемые функции машины в заданных нагрузочно-скоростных режимах и условиях применения.

В металлообрабатывающей промышленности одним из весьма важных вопросов следует считать вопрос об устойчивости движения при резании металлов. Появление колебательного процесса определенной интенсивности при обработке резанием является во многих случаях основной причиной, ограничивающей возможность повышения режима резания, а следовательно, и производительность.

Кроме того, появление периодического колебательно-го движения при резании металлов вредно отражается на стойкости режущего инструмента, а также на исправности и долговечности станка, так как оно обычно создает относительно большие дополнительные динамические нагрузки на инструмент и станок.

Решение указанных выше задач связано с необходимостью выбора режимов механической обработки изделий с учетом динамических (действительных) свойств технологической системы. Определяющее влияние на динамические процессы в технологической системе оказывает основообразующая подсистема — металлорежущий станок.

Режимы резания в основном выбирают в зависимости от сил резания, допускаемой стойкости и прочности режущих инструментов, вида обрабатываемого материала, формы обрабатываемых заготовок, допускаемой прочности узлов станка, его мощности, а также из условий наибольшей производительности. Опыт работы на металлорежущих станках и проведенный анализ режимов резания, применяемых в производственных условиях, показали, что их значения в ряде случаев не соответствуют рекомендуемым. Такое несоответствие можно объяснить тем, что рекомендуемые режимы резания часто определяются в лабораторных условиях без учета влияния на них технологических и динамических факторов обработки, таких как жесткость технологической системы, деформации инструментов и мест их крепления;

собственных частот вибраций обрабатываемой заготовки; частоты ввода инструментов в работу; виброустойчивых технологических схем обработки и т. п.

Изменения перечисленных факторов, ухудшающих условия обработки, вызывают в технологической системе высокочастотные и низкочастотные вибрации, которые ухудшают точность обработки заготовки и качество ее металла поверхностного слоя, не позволяют работать с применением оптимальных режимов резания. Под технологической системой понимается совокупность станок — инструмент — приспособление — обрабатываемая заготовка. Технологическая система вибрирует с большей или меньшей интенсивностью во всех случаях обработки материалов резанием.

Металлорежущий станок, как и любое другое оборудование или устройство, можно рассматривать как колебательную систему со многими степенями свободы, в каждой из которых, как в самостоятельном контуре, возникают вибрации определенной интенсивности. В связи с этим при работе станка во всех звеньях технологической системы возникают колебания различных видов.

Широкое внедрение в машиностроение высокопроизводительных методов скоростной и высокоскоростной обработки материалов резанием, повышение точности деталей машин, улучшение качества обработки поверхности — все эти процессы неразрывно связаны с вопросом устойчивости при механической обработке заготовок деталей машин.

Вибрации, возникающие в технологической системе, влияют на стойкость (работоспособность) режущего инструмента, а в ряде случаев могут привести к его поломке.

Станки, работающие на вибрационных режимах, значительно быстрее изнашиваются, стыковые зазоры увеличиваются, и оборудование скорее выходит из строя. Значительный шум, возникающий при вибрациях, сказывается на утомляемости рабочего.

Возможность возникновения вибраций во многих случаях заставляет снижать режимы резания и ограничивать производительность металлорежущих станков.

Все сказанное убеждает нас в том, что вибрации при обработке заготовок и борьба с ними являются одним из весьма важных вопросов, связанных с механической обработкой материалов резанием.

Бороться с вибрациями металлорежущих станков часто труднее, чем с вибрациями других машин, так как колебания даже в несколько микрометров, особенно это касается чистовых и отделочных операций, недопустимы. Кроме того, вибрации при резании обычно возникают в достаточно широком диапазоне условий и режимов резания, тогда как колебания в других машинах обычно происходят в узком диапазоне, при каких-то определенных условиях.

Динамические характеристики станков необходимо знать и, по возможности, задавать при проектировании и решении задач автоматизации процессов механической обработки, в частности, при проектировании систем числового программного управления (ЧПУ), создании гибких автоматизированных производств (ГАП), разработке и внедрении в производство автоматизированных узлов управления.

Проблемами изучения динамики и вибраций металлорежущих станков и их влияния на точность, качество и производительность процесса обработки заготовок занимаются с середины XX века и по настоящее время.

Известны работы многих ученых и научных коллективов, как отечественных, так и зарубежных: И. С. Амосова, Б. П. Бармина, В. Л. Вейца, Д. В. Василькова, Ю. И. Городецкого, Н. А. Дроздова, И. Г. Жаркова, В. Л. Заковоротного, А. И. Каширина, С. С. Кедрова, В. А. Кудинова, Л. С. Мурашкина, В. В. Максарова, А. А. Маталина, В. Н. Подураева, А. В. Пуша, Д. Н. Решетова, Э. В. Рыжова, А. П. Соколовского, В. К. Старкова, А. Г. Суслова, Н. В. Талантова, Н. С. Штейнберга, М. Е. Эльясберга, а также С. Дой и С. Като, Г. Опитца, Е. Салье, И. Тлустого и др.

Выдающуюся роль в решении проблем автоколебаний в металлорежущих станках сыграли работы В. А. Кудинова,

В. Л. Вейца и М. Е. Эльясберга. Благодаря их работам и работам их учеников к концу XX века был достигнут значительный прогресс в исследовании природы автоколебаний в станках, создании динамических моделей технологических систем механической обработки лезвийным и абразивным инструментом, разработке эффективных методов управления этими системами.

Что касается вынужденных колебаний в металлорежущих станках, то их исследования и расчет принципиальных трудностей не представляет, учитывая современный уровень развития прикладной теории колебаний, а также наличие множества программ для ПК.

При работе станка во всех звеньях технологической системы могут возникать колебания различных видов. В зависимости от жесткости технологической системы и ее конструкции в процессе обработки заготовок могут возникать вынужденные, параметрические и автоколебания (самовозбуждающиеся колебания).

Колебательным движением или просто колебанием называют такое изменение какой-либо физической величины, которому свойствен переход от возрастания к убыванию.

Обычно для колебательного процесса характерно неоднократное чередование этих переходов, однако к колебательному движению может быть отнесен и единичный переход, с которым приходится сталкиваться, например, при изучении импульсных процессов.

Как показывает практика, физическая сущность тех процессов, в которых имеют место колебания, различна. Так, колебания металлорежущего станка и колебания контура в электрической схеме — совершенно различные явления. Но тем не менее даже беглое знакомство с законами колебаний как в первом, так и во втором случаях показывает много общего между ними.

Детальный анализ колебательных процессов, встречающихся в физике и технике, приводит нас к выводу, что основные законы колебаний во всех случаях одинаковы и описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями.

Так, например, дифференциальное уравнение свободных колебаний материальной точки имеет вид:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}x = 0,$$

где c — коэффициент пропорциональности при упругой силе; m — масса точки.

Уравнение малых колебаний физического маятника имеет такой вид:

$$\ddot{\varphi} + \frac{Ps}{I_Z}\varphi = 0,$$

где P — вес маятника; s — расстояние от точки привеса до центра тяжести маятника; I_Z — момент инерции маятника относительно оси привеса.

А дифференциальное уравнение электрического колебательного контура, состоящего из последовательно соединенных конденсатора и катушки, обладающей индуктивностью, имеет такой вид:

$$\ddot{I} + \frac{1}{LC}I = 0,$$

где I — ток в контуре; L — индуктивность в катушке; C — емкость конденсатора.

Если обозначить постоянные величины

$$B(1): \frac{c}{m} \equiv k^2,$$

аналогично

$$B(2): \frac{Ps}{I_Z} \equiv k^2 \quad \text{и} \quad B(3): \frac{1}{LC} \equiv k^2,$$

а переменные — через y , то все эти случаи движения описываются одним и тем же однородным дифференциальным уравнением второго порядка: $\ddot{y} + k^2y = 0$.

Такая, в известном смысле, универсальность законов колебательных процессов заставляет выделить изучение их в отдельную дисциплину, которая носит название теории колебаний.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ

Колебательные и волновые процессы весьма часто встречаются в окружающей нас природе и технике. Значительная часть механических движений, движение периодически работающих машин, почти все акустические явления, переменный ток, применяющийся в быту и в разнообразных технических устройствах, радиотехника и часть электроники, вся волновая оптика, волновые свойства частиц — вот далеко не полный перечень явлений и технических приложений, описываемых на языке колебательных и волновых процессов.

Создание современных машин немыслимо без учета колебательных процессов, во многом определяющих производительность машин, долговечность и надежность оборудования, качество продукции и условия труда оператора.

При проектировании любых машин и механизмов рекомендуются следующие этапы динамического расчета:

- 1) разработка динамической модели — идеализированное представление рассматриваемой системы, используемое при ее теоретическом исследовании и инженерных расчетах;
- 2) составление математической модели, соответствующей динамической модели рассматриваемого объекта, в виде дифференциальных, интегральных либо интегродифференциальных уравнений;
- 3) решение математической модели и анализ полученных результатов;
- 4) экспериментальная проверка, в результате которой определяется достоверность выбранной динамической модели.

Динамические модели условно разделяются на три вида: модели с распределенными параметрами, модели с сосредоточенными параметрами и комбинированные модели, состоящие из подсистем первых двух видов.

В моделях с распределенными параметрами наиболее полно отражаются свойства реальной механической системы. Однако из-за сложности решения подобных задач эти модели имеют весьма ограниченное применение. Они характеризуются бесконечным числом степеней свободы.

В инженерных расчетах наибольшее применение получили модели с сосредоточенными параметрами, в которых число степеней свободы ограничено. При построении таких моделей исходят из следующих предположений:

- инерционные свойства системы отображаются массами в случае поступательного движения либо моментами инерции — в случае вращательного движения, которые сосредоточены в отдельных точках или сечениях;
- эти точки или сечения соединены безынерционными упругодиссипативными, геометрическими и кинематическими связями.

1.1. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Процесс, характеризующийся многократным поочередным возрастанием и убыванием рабочего параметра во времени, называют колебательным процессом, или просто колебаниями.

Большинство наблюдаемых в природе и технике процессов являются колебательными: вибрация звучащей струны, землетрясение, распространение электромагнитных волн, вибрации оборудования при его работе и т. п.

Рассмотрим колебательные процессы, происходящие в механических системах, которые принято называть механическими колебаниями, или вибрациями.

Термин «вибрация» чаще всего применяют для процессов, характеризующихся малыми амплитудами колебаний и достаточно высокими частотами.

Число степеней свободы — количество независимых числовых параметров, однозначно определяющих положение всех точек системы в пространстве. Различают системы с конечным и бесконечным числом степеней свободы. Если число степеней свободы бесконечно, то такие системы называют распределенными.

Линейные и нелинейные системы. Система называется линейной, если ее свойства (упругость, масса, коэффициент трения) остаются постоянными при изменении состояния системы, т. е. не зависят от смещений или скоростей. Процессы в линейных системах описываются линейными дифференциальными уравнениями. Если это условие не соблюдается, то система нелинейная, а процессы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

Стационарные и нестационарные системы. Если свойства системы не изменяются на данном отрезке времени, то систему называют стационарной. В противном случае, при изменении свойств системы во времени, ее называют нестационарной. Процессы, происходящие в стационарных системах, описываются дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами; нестационарные процессы — дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами.

Автономные и неавтономные системы. Колебательные процессы в автономных системах происходят за счет внутренних источников энергии либо энергии, сообщенной системе в виде начального возмущения. Остальные системы называются неавтономными.

Консервативные и неконсервативные системы. Если полная механическая энергия системы остается постоянной при колебаниях, то система называется консервативной. В противном случае система — неконсервативная. Среди неконсервативных систем можно выделить две системы, обладающие характерными свойствами:

- 1) диссипативная система — система, в которой полная механическая энергия при любом движении соответствующей автономной системы убывает;

2) автоколебательная система — система, называемая так, если она стационарна и автономна и если при определенных условиях в ней возможно самовозбуждение колебаний.

Эти системы характеризуются наличием в них источника энергии неколебательной природы, причем поступление энергии регулируется движением самой системы.

КЛАССИФИКАЦИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Свободные колебания. Колебания, совершающиеся при отсутствии переменного внешнего воздействия и без поступления энергии извне, называются свободными колебаниями. Они происходят за счет первоначального накопления энергии системой. Свободные колебания происходят только в автономных системах.

Вынужденные колебания вызываются переменным внешним воздействием и характерны для неавтономных систем.

Параметрические колебания вызываются изменением во времени параметров самой системы и возникают в нестационарных системах.

Автоколебания — это самовозбуждающиеся колебания.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Колебания называются периодическими, если любые значения колеблющейся величины повторяются через равные промежутки времени.

Среди разнообразных периодических колебаний особое место занимает гармоническое колебательное или просто гармоническое движение.

Математическая запись периодических колебаний:

$$U(t) = U(t + T), \quad (1.1)$$

где T — период колебаний, с; t — момент времени, с.

Величина, обратная периоду колебаний, называется частотой колебаний:

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Гц)}. \quad (1.2)$$

В технике часто применяют понятие угловой частоты колебаний:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \text{ (рад/с)}. \quad (1.3)$$

Простейшим и наиболее важным видом периодических колебаний являются гармонические колебания, переменная величина которых X (это может быть перемещение точки, скорость и т. п.) изменяется во времени по закону:

$$x = X_m n \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1.4)$$

где x — мгновенное смещение в момент времени t ; X_m — амплитуда, т. е. наибольшее отклонение от положения равновесия ($x = 0$); начальная фаза φ_0 определяет смещение в момент $t = 0$. Если начало отсчета времени произвольно, то удобно выбирать его так, чтобы в момент $t = 0$ смещение было максимальным ($\varphi_0 = 0$) или нулевым

$$\left(\varphi_0 = -\frac{\pi}{2} \right).$$

Тогда выражение (1.4) примет более простой вид:

$$x_1 = X_m \cdot \cos \omega t ; \quad x_2 = X_m \cdot \sin \omega t .$$

Очевидно, синусоидальное движение также является гармоническим, и свойства косинусоидального и синусоидального движения совершенно одинаковы.

Аргумент ($\omega t + \varphi$) называется фазой колебаний в момент времени t .

Скорость гармонических колебаний

$$\dot{x} = \frac{dU}{dt} = \omega \cdot A \cdot \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (1.5)$$

а ускорение

$$\ddot{x} = \frac{d^2U}{dt^2} = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 + \pi). \quad (1.6)$$

В технической литературе перемещение, скорость и ускорение при колебательном движении называют соответственно виброперемещением, виброскоростью, виброускорением.

Особое внимание уделяется в технике гармоническому движению. Объясняется это тем, что существует большое число технических и физических систем, совершающих гармоническое движение. Кроме того, во многих случаях негармоническое движение можно свести к сумме гармонических движений, причем эти составные движения доступны непосредственному наблюдению и изучению при помощи современной аппаратуры и компьютерных программ.

Согласно выражению (1.4), гармоническое движение должно быть бесконечным во времени. Действительные процессы, конечно, имеют начало и конец. Но, если система совершает достаточно большое число колебаний, то их свойства весьма близки к свойствам гармонического движения.

Понятие «гармоническое движение» используется достаточно широко. По гармоническому закону могут изменяться линейное или угловое смещение тела, деформации упругого тела, вибрации двигателя, напряжение и ток в электрической цепи и т. п.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИЛ

Силы, действующие на механическую систему, разнообразны по своей природе и по влиянию, которое они оказывают на характер колебательного процесса. Рассмотрим основные из них.

Позиционные силы. Это силы, величина которых определяется отклонением системы от положения равновесия. К их числу относятся, например:

- восстанавливающая сила упругости

$$F = -cx,$$

где c — коэффициент жесткости; x — перемещение;

- выталкивающая сила (закон Архимеда)

$$F = f(V),$$

где V — объем воды, вытесненный телом, погруженным в жидкость.

Восстанавливающие силы могут быть линейными и нелинейными.

Диссипативные силы. Это силы сопротивления, пропорциональные скорости перемещения системы, приводящие к рассеиванию механической энергии при колебаниях. К их числу относятся:

- сила сухого трения

$$R = b \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|},$$

где $\dot{x}$ — скорость; b — положительная постоянная;

- сила вязкого трения

$$R = b\dot{x}.$$

Диссипативные силы также могут быть линейными и нелинейными.

Вынуждающие силы. Это внешние силы, действующие на систему и вызывающие ее колебания. Они являются функциями времени и не зависят от движения системы, к которой приложены. К их числу относятся:

- гармонические силы, возникающие, например, в результате вращения неуравновешенных масс

$$P = P_0 \sin \omega t;$$

- периодические силы негармонического характера, например, инерционные нагрузки в кривошипно-шатунных механизмах

$$P = P(t);$$

- импульсные силы, возникающие в работе ударных устройств;
- нестационарные силы, действующие, например, на подвеску автомобиля во время его движения по неровностям дороги.

1.2. ДИНАМИКА И ЭНЕРГЕТИКА ГАРМОНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Уравнения (1.5) и (1.6) свидетельствуют о наличии ускорения при гармоническом движении. Предполагая, что материальная точка массы m , прикрепленная к концу невесомой пружины, совершает колебания (см. рис. 2.1), применим второй закон Ньютона и найдем силу, развивающуюся при гармоническом движении:

$$f = m\ddot{x} = m\omega^2 X_m \cos(\omega t + \phi_0 + \pi) = -kx, \quad (1.7)$$

где величина

$$k = m\omega^2 = \frac{|f|}{|x|}, \quad (1.8)$$

численно равная силе, создающей единичную деформацию, называется «жесткостью». Как видно из выражения (1.7), сила пропорциональна смещению и всегда направлена к положению равновесия; ее называют упругой силой. Эта сила возникает, в частности, при небольших деформациях упругих тел (закон Гука), чем и объясняется широкое распространение механических колебаний в физике и технике.

Если сила подчиняется закону (1.7), но не является упругой по своей природе, как, например, сила тяжести, то ее называют квазиупругой (как бы упругой), и при этом можно формально сохранить и термин «жесткость».

Очевидно, жесткость численно равна силе, возникающей при смещении, равном единице.

Так как уравнение (1.7) является линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, не зависящими от смещения и его производных, то и

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru