

УДК 534

УДАРНЫЕ И ВИБРОУДАРНЫЕ МАШИНЫ И УСТРОЙСТВА

В.Л. Крупенин

В конце мая этого года в Звенигороде планируется проведение XVI –го Международного симпозиума по виброударным (сильно нелинейным) системам. К его открытию мы и приурочили эту статью.

Удар: суть явления. Удар как механическое явление характеризуется двумя основными свойствами. Во-первых, быстротой свершения: за очень малое с точки зрения механики время (порядка долей миллисекунд) скорость точек механической системы резко изменяется. Во-вторых, возникновением (и, естественно, быстрым исчезновением) ударных сил, настолько больших, что во время удара все силы, кроме этих, можно просто не принимать во внимание. Понять, почему удар любого типа характеризуется этими двумя свойствами, легко, рассмотрев самый простой случай прямого центрального удара.

Вообразим себе стальной шарик, который летит прямолинейно с заданной скоростью. Предположим, что на его пути поставлена преграда (ограничитель) в виде очень массивного упругого тела, настолько массивного, что шарик при любой скорости не сдвинет его.

Итак, удар. Шарик «внедряется» в ограничитель, деформирует его, деформируется сам, теряет скорость; кинетическая энергия шарика превращается в потенциальную энергию упругой деформации. Обычно полагают ограничители очень жесткими, т. е. для того, чтобы их деформировать, нужны большие усилия. Поэтому потеря кинетической энергии происходит почти моментально, и лишь слегка «внедрившись» в материал ограничителя, шарик останавливается. Тем самым заканчивается первый, нагрузочный акт удара: кинетическая энергия равна нулю, потенциальная энергия упругой деформации максимальна и равна кинетической энергии перед началом удара.

Сразу же начинается второй, разгрузочный акт удара. Теперь сжатые участки стремятся вернуться в прежнее состояние, разгоняют шарик и столь же быстро выталкивают его обратно. Шарик приобретает почти ту же самую скорость, что и перед ударом, только теперь он будет двигаться в обратном направлении.

Итак, и быстротечность удара, и его сила определяются жесткостью контактирующих тел. В свою очередь, жесткость определяется свойствами материала: при прочих равных условиях удариться об асфальт гораздо больше, чем о землю.

В практических расчетах часто вводят в рассмотрение абсолютно жесткий ограничитель, для которого время удара равно нулю (удар предполагается мгновенным), а сила — бесконечности. Подобная идеализация существенно упрощает расчеты и не всегда так уж искажает суть происходящего, по крайней мере, в том случае, когда мы интересуемся только движением шарика и игнорируем физические процессы, происходящие в ограничителе.

Картина удара, описанная только что, рассматривает лишь один из возможных вариантов. Эта картина, кроме того, содержит много искусственных упрощений. В

действительности все гораздо сложнее.

Виброударные процессы. Большие силы, возникающие при соударении твердых тел, используются в технике для создания интенсивных воздействий на обрабатываемые материалы и среды. Модель удара, о которой говорилось выше, сильно упрощена. На самом деле удар вызывает в соударяющихся телах сложные динамические (волновые) процессы, которые и определяют результат его действия. Соударяющиеся системы после одного или, некоторого числа ударов могут перейти в другое состояние или разрушиться. Цель деятельности большинства традиционных машин ударного действия состоит в организации соударений, в результате которых обрабатываемые материалы и среды претерпевают с точки зрения механики достаточно радикальные изменения. Ниже, впрочем, читатель увидит, что машины и механизмы ударного действия могут нести и гораздо менее очевидные функции.

Для большей эффективности работы машины ударного действия организованы так, что удары следуют систематически, например через равные промежутки времени T_1 . Возможный вид графического изображения силового воздействия $F(t)$, на обрабатываемую среду показан на рис. 1. Это T_1 — периодическая последовательность импульсных функций. Возрастающая ветвь каждого «импульса» соответствует нагрузочному акту удара, убывающая — разгрузочному. Время отклика «импульсов» от нуля и есть время удара. Для реальных технических систем оно изменяется в диапазоне 10^{-3} — 10^{-5} с. Систематические удары, конечно, не обязательно должны следовать периодически и (или) изображаться на графике столь просто; возможны и другие случаи.

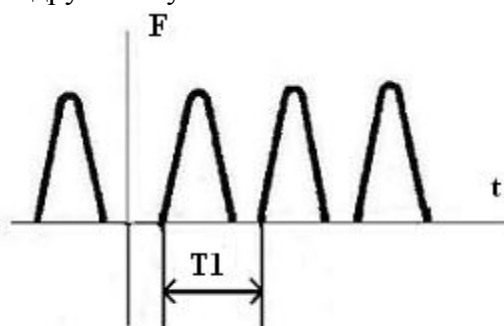


Рис. 1

Чтобы разобраться в динамике систем, движение которых сопровождается такими вот систематическими ударами, напомним некоторые сведения из теории колебаний. На рис. 2 показана конструкция из упругой балочки-пружины и массивного твердого тела (шара).



Рис. 2

Если по шару ударить, то он начнет двигаться согласно закону, графическое изображение которого дано на рис. 3. Это переходный процесс, носящий из-за рассеяния энергии затухающий характер. Показанная величина T_0 (период собственных колебаний системы) при определенных условиях постоянная и дается

формулой $T_0 = 2\pi\sqrt{mc^{-1}}$, где m — масса, а c — упругость системы. Величина $f_0 = T_0^{-1}$ — частота собственных колебаний.

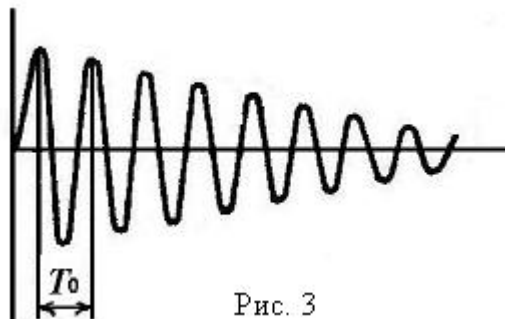


Рис. 3

Дальше мы будем говорить о внешних силах, действующих на колебательные системы. В реальных устройствах организация внешнего силового воздействия определяется их спецификой (см. ниже). В лабораторных условиях для системы «балочка—шар» внешние воздействия создаются при помощи специальной аппаратуры. Если внешняя сила синусоидальна и имеет период T (частоту $f=T^{-1}$), то график $x(t)$ — установившийся процесс — также синусоида того же периода (рис. 4). Величина A — амплитуда колебаний, равная максимальному отклонению системы от положения равновесия, зависит от частоты f примерно так, как показано на рис. 5. Вблизи $f = f_0$ амплитуда резко возрастает, что свидетельствует о резонансе. Если рабочий орган вибромашины настроить в резонанс, то ее эффективность будет максимальной. Однако для систем с ударами резонансные колебания происходят совсем в других частотных диапазонах, так что настройка в резонанс на собственной частоте «шарика на пружине» ничего не дает.

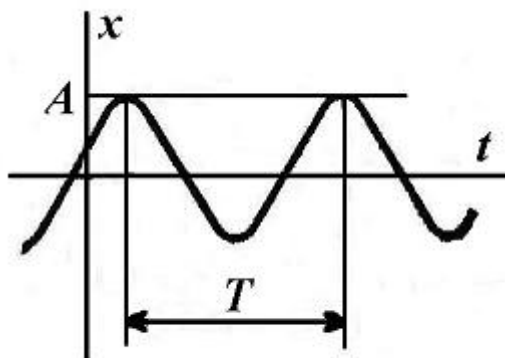


Рис. 4

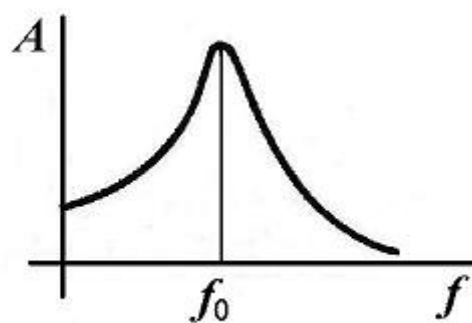


Рис. 5

Если вблизи конструкции (рис. 2) установить одни или два неподвижных ограничителя, то получаются системы, которые называют виброударными. Система, показанная на рис. 6, называется системой с зазором $\Delta > 0$, на рис. 7 — с симметричными ограничителями, на рис. 8 — с нулевым зазором. Наконец, в системе на рис. 9 пружина оказывается предварительно натянутой, так что здесь $\Delta < 0$.

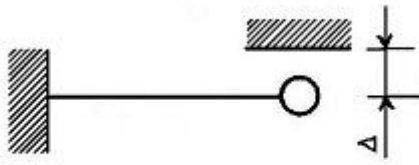


Рис. 6

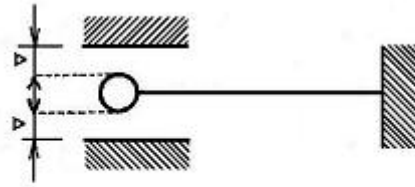


Рис. 7

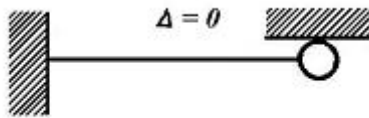


Рис. 8

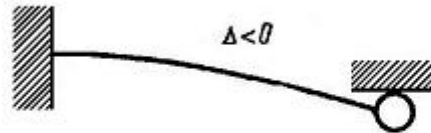


Рис. 9

К описанным сейчас «эталонным» системам «упругость + массивное тело + ограничители», как мы увидим ниже, приводятся динамические модели многих реальных ударных машин, поэтому о них стоит поговорить подробнее.

Пусть к шарам приложены периодические синусоидальные силы частоты f , под действием которых устанавливаются периодические режимы с соударениями; их называют виброударными процессами. Когда рассуждения ведутся довольно общо, сказать что-либо однозначное о характере виброударного процесса нельзя. Ибо даже в такой «простенькой» системе, как наша, многообразие всех возможных режимов движения поистине поразительно. Нас будут интересовать виброударные процессы, чаще всего встречающиеся на практике. Они характеризуются известной «правильностью»: в случае односторонних ограничителей на один период внешней силы приходится один удар, в случае двухсторонних — два, и удары следуют поочередно. Если трение в системе невелико, то интенсивные колебания можно поддержать при помощи не очень больших сил возбуждения. В этом случае, типичные примеры виброударных процессов в системах, показанных на рис. 6—9, приведены на рис. 10—13. Интересно подчеркнуть, что такие простые на вид режимы получаются в результате сложного взаимодействия переходных процессов (см. рис. 2), ведь виброударные режимы есть результат систематических соударений, а каждый удар порождает свой переходный процесс.

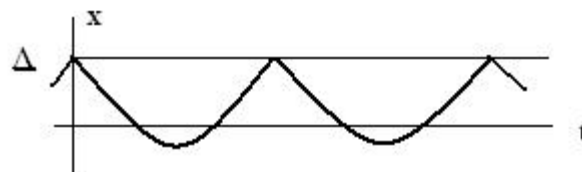


Рис. 10

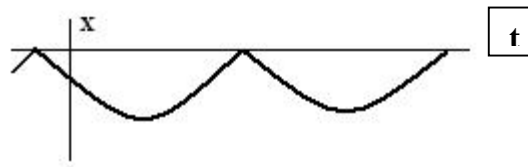


Рис. 11

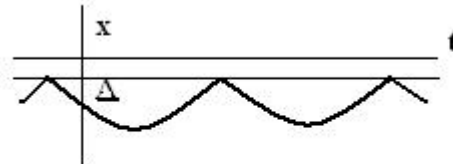


Рис. 12

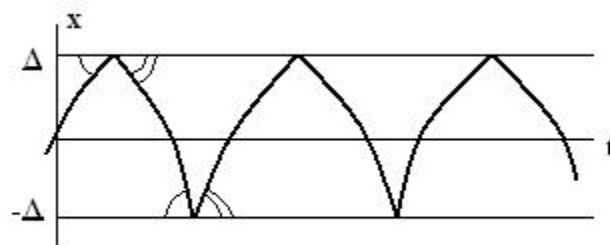


Рис. 13

На рис. 14—16 показаны возможные варианты зависимостей амплитуд колебаний для процессов, изображенных на рис. 10—13, от частоты внешней силы. Теперь в силу несинусоидальности этих процессов амплитудой называют полуразмах колебаний — половину расстояния, проходимого шаром от крайнего нижнего до крайнего верхнего положений.

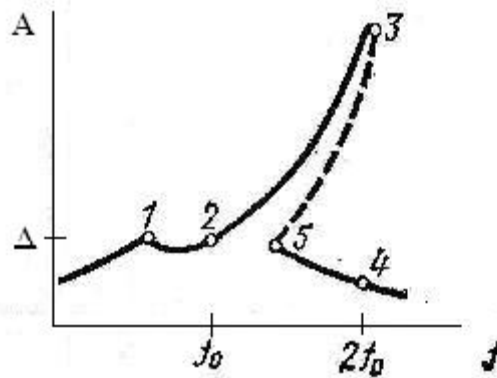


Рис. 14

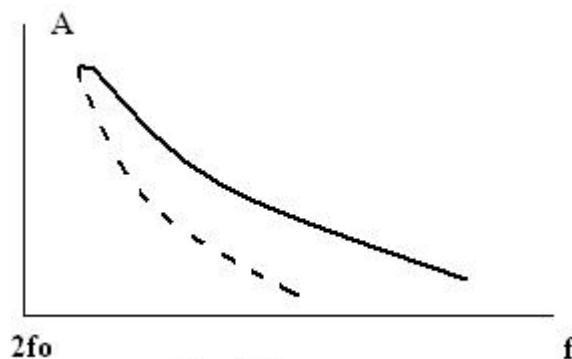


Рис. 15

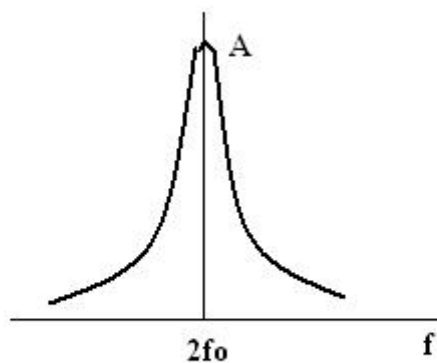


Рис. 16

Для системы рис. 6 при достаточно большом значении зазора зависимость $A(f)$ может иметь вид, показанный на рис. 14. Как видим, теперь мы получили многозначную функцию частоты и максимум приходится не на собственную частоту безударной системы, а лежит гораздо правее, где-то вблизи ее удвоенного значения. Кроме того, здесь появляется ветвь, обозначенная пунктиром; экспериментально обнаружить ее невозможно (ее называют неустойчивой), и появляется она только в расчетах.

Участок кривой $A(f)$ вплоть до отмеченного цифрой 1 соответствует безударным колебаниям системы. Здесь движение тождественно установившемуся режиму на рис. 4. Точка 1 соответствует касанию ограничителя колеблющимся шаром и появлению режимов с ударами. Вплоть до точки 2 (частота $f = f_0$) движение носит довольно вялый характер: полуразмах колебаний может даже оказаться меньше зазора. На следующем участке колебания начинают резко нарастать, и это нарастание происходит до тех пор, пока не приходим в точку 3, после чего происходит внезапный срыв виброударного режима (точка 4), и дальше вновь начинается безударный режим. Если теперь попытаться плавно изменять частоту в обратном направлении, то вернуться на участок 2—3 не так-то просто. Сначала будет снова происходить нарастание безударного режима (участок 4—5), а появление интенсивных соударений произойдет только после дополнительного толчка колеблющегося тела или прохода левее точки 5.

Для системы с натягом график $A(f)$ будет иметь вид, показанный на рис. 15. Здесь опять-таки имеется не реализующаяся на практике неустойчивая ветвь. Естественно, для того чтобы запустить подобную систему, необходимо преодолеть статическую силу натяжения, для чего снова не обойтись без толчка.

Для систем с нулевым или близким к нулю зазором зависимость $A(f)$ (рис. 16) напоминает представленную на рис. 5. Только теперь резонанс наступает вблизи частоты $f = 2f_0$.

Интересный вид имеет функция $A(f)$ симметричной системы рис. 17. Здесь полуразмах колебаний не может превосходить значения Δ ; если учесть это обстоятельство, то можно понять, что данная кривая во многом аналогична рис. 14. Так участок 1—2 соответствует вялым движениям с ударами об один из ограничителей; точка 4 отвечает наиболее интенсивному высокочастотному виброударному режиму, который может легко сорваться, и т. д.

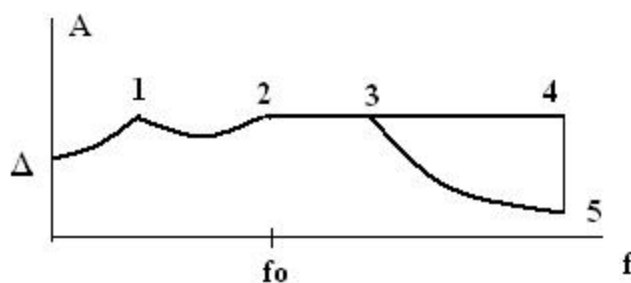


Рис. 17

Таким образом, резонансные колебания в виброударных системах принципиально отличаются от колебаний в системах без ударов. Если в последних максимальные амплитуды наблюдаются вблизи единственной резонансной частоты, увод от которой хотя и вызывал спад амплитуды, но все же качественно не влиял на свойства режима, то в виброударных системах наиболее интенсивные режимы существуют вблизи частот срыва. Здесь малый увод, наступающий, например, вследствие случайного, изменения параметров, может привести, к качественному изменению картины движения: виброударные режимы могут внезапно прекратиться. В то же время работа именно на этих частотах особенно заманчива: естественно желание «выжать» из машины наибольшую интенсивность.

Сказанное имеет большое значение для теории и практики машин виброударного действия. Необходимость работы вблизи частоты срыва ставит очень интересную проблему. Надо научиться стабилизировать наиболее нестабильные режимы. Эта задача в большом числе случаев может быть решена, и в дальнейшем мы вернемся к ней.

Наряду с виброударными в технике используют еще и так называемые редкоударные процессы. Они характеризуются тем, что частота следования порождающих их ударов оказывается очень низкой. Это приводит к тому, что каждый последующий удар действует уже после того, как закончился переходный процесс, вызванный предыдущим ударом; Поэтому редкоударные процессы представляют собой последовательность «склеенных» переходных режимов (рис. 3). В отличие от виброударных систем, в которых режимы движения устанавливаются в результате многократного взаимодействия переходных процессов, системы с редкими

ударами реализуют движение, представляющее собой как бы «сумму» действия одиночных ударов.

Ударами могут сопровождаться не только движения твердых тел, но и жидкостей или газов, Относящиеся к этому проблемы не входят в круг обсуждаемых.

Виброударные машины для погружения свай. Наш рассказ об ударных машинах начнем с систем, дальним родственником которых является известный с незапамятных времен обыкновенный молоток. Виброударным погружением называют внедрение твердого тела (например, сваи) в грунт под действием периодических ударов. Естественно, что этому противодействуют лобовое и боковое сопротивления, которые удары и помогают преодолеть.

Особенно эффективен удар при работе в маловлажных грунтах. Удары торца сваи о грунт уплотняют его и он «выпирает» в стороны. Интересно отметить, что само уплотнение тоже входит в «сферу интересов» ударных процессов. Например, сыпучий грунт можно представить себе как собрание мелких твердых частиц, между которыми остается свободное пространство. При действии сваи на грунт частицам, соприкасающимся с торцом сваи, придается скорость, и они многократно (из-за ударов) взаимодействуют друг с другом. В результате свободное пространство между частицами уменьшается, они расходятся в стороны, и свая входит в грунт.

Устройства, которые ударяют по свае, называют вибромолотами. Их используют и в других областях строительства и промышленности, где периодически следующие удары составляют основу технологического процесса. Многие конструкции вибромолотов при расчетах приводят к системе (рис. 6). Роль неподвижного ограничителя выполняет тело, по которому наносятся удары, массивного шара — тело, которое наносит удар; пружинный элемент может выполнять роль упругого подвеса или нести какие-либо другие конструктивные функции. Для возбуждения гармонических колебаний используют разнообразные виды специальных вибровозбудителей, которые, раскачивая ударник, приводят машину в рабочее состояние. При забивке свай, как правило, используется совместное действие ударов и вибрации; в присутствии последней понижается сопротивление грунта.

Разумеется, виброударные машины используются для погружения не только свай, но и труб, шпунта и др. При погружении труб, например, значительный эффект приносит одновременное действие продольных ударов и вращательной вибрации.

Виброударные погружающие машины на современном производстве или в строительстве весьма разнообразны: беспружинные и пружинные вибромолоты, вибромолоты, создающие либо только продольные, либо продольно-вращательные удары, вибромолоты с применением дополнительных статических сил и др. Кстати, следует отметить, что виброударные машины можно применять не только для погружения разнообразных элементов в грунт, но и для их извлечения из него.

Виброударный способ погружения весьма эффективен, но в настоящее время масса погружаемых тел, как правило, не превышает 5 т. Как известно, при ударе двух тел энергия от одного к другому передается наилучшим образом в случае примерного совпадения их масс. Поэтому для эффективного процесса масса погружаемой сваи должна примерно равняться массе ударника вибромолота. Расчеты и практика показывают, однако, что создать долговечный и Надежный вибромолот с массой ударника более 5 т пока невозможно. Для погружения более массивных тел применяют вибрационный способ.

Как для вибромолотов, так и для других машин, речь о которых пойдет ниже, весьма важной оказывается проблема стабилизации наиболее эффективных режимов

работы. Каким образом эта проблема может решаться, будет рассказано ниже, а сейчас мы познакомимся с машинами, занимающимися обработкой грунта.

Трамбование, рыхление и прокладка подземных коммуникаций. При разнообразных строительных и земляных работах, прокладывании коммуникаций, благоустройстве городов и т. д. широко применяют машины и устройства для трамбования и рыхления грунта. Хотя эти два процесса как бы противоположны, для их реализации часто прибегают к машинам виброударного действия. Рассмотрим сначала трамбовочные машины.

Среды, которые требуется уплотнять, очень разнообразны: различные грунты, насыпи, дорожные основания и т. п. Они имеют различные химико-механические характеристики, в соответствии с этим современная техника поставляет большое количество типов и разновидностей трамбуемых виброударных машин. Принцип их работы основан на свойстве грунта уплотняться под действием ударов. Уплотнение при трамбовании происходит послойно. Рабочий орган трамбовочной машины в зоне соприкосновения с грунтом делают плоским. Удар, действуя на некоторую часть поверхностного слоя грунта, вызывает в нем необратимую деформацию, приводящую в результате к уплотнению.

Главным «врагом» трамбования оказались глины. Присутствуя практически в каждом грунте, глины связывают его, повышая тем самым сопротивляемость грунта ударному воздействию. Сильно связанные грунты трудноуплотняемы. Для повышения эффективности работы полезно организовать совместное действие ударов, вибрации, статических сил и настроить машину в резонансный режим.

Виброударные трамбуемые машины (трамбовки) — ручные или передвигающиеся при помощи механических устройств. К последним относят самопередвигающиеся, буксируемые, накладные и др. При упрощенной схематизации некоторые типы трамбовок можно снова описать при помощи динамических моделей (рис. 6—9), массивный шар моделирует теперь уплотняющий орган, а возбуждение колебаний осуществляется каким-либо вибровозбудителем. «Самопередвигаются» трамбовки, как правило, благодаря «наклонному» направлению их прыжков, буксируемые машины — при помощи тягачей. Накладные машины в нужную позицию выставляются грузоподъемными устройствами, а после работы их передвигают на новое место. Легкие ручные трамбовки переставляет и удерживает непосредственно человек.

Весьма популярны тяжелые самопередвигающиеся трамбовки. Они достаточно эффективно обрабатывают грунты со значительным содержанием глин. Передвигаются они (высота до 40 см и длина до 15 см) силой систематических взрывов горючей смеси в цилиндре, установленном в корпусе машины. При взрыве машина подпрыгивает и падает на грунт, выполняя требуемую работу. Масса трамбовок такого типа от 100 кг до 2,5 т. Основные параметры их работы варьируются в зависимости от типа конкретной машины и свойств грунта. Частота ударов для наиболее легких трамбовок порядка 120 в минуту, наиболее тяжелых - 80. Глубина уплотнения от 40 до 70 см. Самопередвигающиеся вибротрамбовки нередко снабжают и дебалансными виброприводами. Иногда такие машины устанавливают «в связке» по несколько штук.

При работе большинства буксируемых трамбовочных машин требуемый эффект так или иначе достигается ударами массивных поддонов. Обилие конструкций машин такого типа объясняется разнообразием технологических задач и видов грунта. Интересно отметить, что при уплотнении щебеночно-гравийных оснований дорог виброударные уплотнительные машины некоторых типов не только превосходят по производительности и качеству работы традиционные самоходные катки, но и в отличие от них почти не дробят уплотняемый материал.

Рассмотрим кратко некоторые проблемы рыхления и разработки грунта при работе с промерзшей землей, строительстве в реставрации дорог, разрушении твердых пород и т. п. Как мы уже говорили, при трамбовании исполнительный орган машины делают плоским. При рыхлении, наоборот, исполнительный орган заострен — рыхлящие клинья, ковши, ножи и т. п. Во время работы происходят систематические соударения исполнительных органов и обрабатываемой среды. В результате разрушаются ее поверхностные слои, а это и нужно для рыхления.

Агрегаты для рыхления это какие-либо базовые машины (тягачи, тракторы, экскаваторы и др.) с присоединенными исполнительными виброударными органами. Виброударные клинья навешивают на тракторы или устанавливают на стрелах экскаваторов. Иногда экскаваторы снабжают ковшами с зубьями, работающими в виброударном режиме. Используют и другую технику: бульдозеры с виброударным отвалом, специальные породоразрушающие виброударные комбайны и т. д.

Виброударные машины активно используют и при прокладке различных подземных коммуникаций. Иногда чрезвычайно трудно или даже невозможно вырыть траншею для укладки, например, трубы или кабеля. Такая ситуация складывается, если по маршруту укладки встречаются дороги, насыпи, строения, холмы и прочие искусственные или естественные препятствия. В подобных случаях виброударные машины «прокладывают» грунт и в образующуюся горизонтальную скважину вставляют нужное для коммуникаций оборудование. Хорошо зарекомендовал себя виброударный «крот», цилиндр, один конец которого заострен. Внутри крота устанавливают пневматический вибровозбудитель, «вводящий» машину в виброударный режим. К заднему основанию цилиндра присоединяют гибкий шланг, подающий в вибровозбудитель сжатый воздух.

При помощи кротов прокладывают горизонтальные скважины длиной до 40 м и диаметром до 15 см. Виброударные кроты малы по массе и по размерам. Все бы хорошо; однако в управлении они не просты: скважина, которую такой крот вырывает, может оказаться искривленной. Неэффективны они и при прохождении через рыхлый или достаточно прочный (скажем, каменный) грунт. Здесь целесообразно использовать вибрационные или виброударные прокалывающие машины других типов.

Системы, о которых мы сейчас говорили, зачастую могут быть рассчитаны при помощи классической теории удара Ньютона (см. приложение). При разработке машин, о которых пойдет речь, ею пользоваться уже нельзя, так как оказываются существенными динамические процессы, происходящие во время самого удара. Классическая теория этими процессами не интересуется.

Ультразвуковое резание. Современные машиностроение и приборостроение, авиация, космическая техника, радиоэлектроника и многие другие отрасли немислимы без материалов со специальными физическими свойствами. Это титановые и жаропрочные сплавы, многочисленные типы керамик, технические алмазы, специальные виды стекла и т. п. Все перечисленные материалы ввиду их хрупкости и твердости практически не обрабатываемы резанием, по крайней мере, в той степени, как того требует современное производство. Так возникла принципиальная задача: найти универсальные методы обработки сверххрупких и твердых материалов и создать затем требуемые обрабатывающие машины. В пятидесятые годы появились первые сообщения о возможности промышленного применения в этих целях виброударных ультразвуковых систем.

Представим себе, что нам необходимо получить отверстие в обычной стеклянной пластинке. Сверлить (даже при помощи каких-либо специальных методов) плохо: в подавляющем большинстве случаев образуется брак — либо пластинка просто

трескается, либо в месте выхода сверла образуются сколы. Ну а если отверстие должно быть не круглым, а фасонным, то даже бракованного изделия получить невозможно. Традиционная технология оказывается бессильной.

Но вот обрабатываемую поверхность покрывают жидкостью с находящимся во взвешенном состоянии абразивом. Зерна абразива — мельчайшие частицы какого-либо твердого материала, например карбида бора; жидкость — как правило, обыкновенная вода. Во взвесь вводится инструмент, колеблющийся с ультразвуковой частотой (16—30 кГц) и небольшой (0,01—0,06 мм) амплитудой. Обработка происходит в результате ударов инструмента по частицам абразива, оседающим на обрабатываемой поверхности. Благодаря соударениям и происходит резание: абразив «выкалывает» мельчайшие частицы материала заготовки, а инструмент, подобно погружаемой свае, постепенно внедряется вглубь. Профиль отверстия при этом в точности соответствует профилю инструмента, и в зависимости от формы инструмента можно получить фасонные отверстия весьма общего вида. Размеры выколотых частиц обрабатываемого материала малы, но огромная (ультразвуковая!) частота соударений позволяет выполнять нужную работу сравнительно быстро. Такая технология дает возможность обрабатывать без брака материалы, еще недавно числившиеся трудно- или даже необрабатываемыми.

Источником внешней энергии в ультразвуковых технологических машинах служат мощные генераторы электрических колебаний, превращаемых в специальных преобразователях в механические. Эти колебания после некоторых дальнейших преобразований и передаются инструменту машины.

Наиболее легко ультразвуковым способом обрабатываются такие материалы, как стекло, кварц, германий, разнообразная керамика, и др. — производительность велика, износ инструмента мал. Хуже обрабатываются жаропрочные и твердые сплавы, закаленные и цементированные стали, и т. п. Здесь производительность падает, инструмент сильно изнашивается. Мягкие стали, свинец и другие подобные материалы обрабатывать ультразвуком нецелесообразно: в силу высокой пластичности этих материалов зерна абразива при ударах как бы «увязают» и инструмент не «погружается». Для таких материалов, впрочем, существуют другие эффективные способы обработки.

Виброударные машины для ультразвукового резания оказались незаменимыми при выполнении самых разнообразных работ. Диапазон их применения огромен: машиностроение и стоматология, ювелирная промышленность и приборостроение. Вряд ли можно найти крупное промышленное предприятие, не оснащенное подобными машинами.

В приборостроении при их помощи делают детали из разных сортов стекла, кварца, титанита бария, флюорита и других материалов. В радиоэлектронике ультразвуковым способом обрабатывают феррит, другие металлокерамические, а также полупроводниковые материалы. На машиностроительных заводах этот способ применяют при изготовлении разнообразных твердосплавных волочильных фильер, матриц, пуансонов и многих других устройств. Разрезка германия, обработка алмазов, сверление в минералокерамике отверстий с резьбой или со спиральными и криволинейными осями — все это под силу ультразвуковой виброударной технологии. В будущем в связи с появлением и внедрением в производство новых видов керамических и полупроводниковых материалов значимость этой технологии возрастет.

Отечественная и мировая техника располагает внушительным списком ультразвуковых технологических машин, которые изготавливаются в виде переносных малогабаритных установок небольшой мощности или достаточно мощных

стационарных станков. Наиболее распространены универсальные и специальные стационарные станки. В зависимости от назначения их выполняют маломощными (выходная мощность генератора колебаний от 30 до 200 Вт), «среднемощными» (250—1200 Вт) или большой (1,5—4 кВт) мощности. Чем больше мощность станка, тем с более крупными деталями и труднообрабатываемыми материалами приходится ему иметь дело.

На маломощных станках, установленных на столах, обрабатывают, например, отверстия малого диаметра в стекле, фарфоре и других материалах. На наиболее распространенных станках средней мощности — отверстия больших диаметров, разделяют кварц, изготавливают фильеры и матрицы небольших размеров и т. п. Эти станки внешне похожи на вертикально-фрезерные или радиально-сверлильные, однако некоторые их типы также выпускают настольными.

Наконец на установках большой мощности обрабатывают изделия из твердых сплавов, изготавливая, например, разнообразные пресс-формы и матрицы больших размеров.

Современные станки не свободны от недостатков. В частности, оказалось, что процесс виброударного ультразвукового резания довольно энергоемок и лишь небольшая часть потребляемой мощности используется в полезных целях, а в основном пропадает впустую. Впрочем, ниже мы расскажем, что никакой особой проблемы здесь уже нет, а есть реальная возможность резко повысить эффективность работы любого ультразвукового станка.

Ударное измельчение. При работе ультразвуковых виброударных установок технологический эффект достигается при ударах по твердым частицам абразива, лежащим на обрабатываемой детали. Идея организации рабочего процесса, сопровождающегося ударами свободных обрабатывающих тел об обрабатываемый материал, реализуется при виброударном измельчении.

Основная технологическая задача здесь — разрушение крупных кусков твердого материала с целью получения его мелких частиц. Это мелкое дробление, помол, смешивание порошков при их одновременном измельчении (гомогенизация) и др. Подобное требуется и в химической и пищевой промышленности, строительстве, горном деле и в других важных отраслях народного хозяйства.

Машины, выполняющие эти операции, называют вибромельницами. Они состоят из одной рабочей камеры (или их набора), из прочного материала и вибровозбудителя, сообщающего системе интенсивные колебания. В рабочие камеры подают обрабатываемый материал и специальные обрабатывающие твердые тела — шары, конусы, стержни и т. д. Эти тела, в чем-то подобны частицам абразива: под действием вибрации в рабочих камерах развивается сложный виброударный процесс, в результате которого разрушается и измельчается обрабатываемый материал.

При работе вибромельниц можно и комбинировать технологические процессы. Скажем, совмещать измельчение с тепловой обработкой. Значительная часть тепловой энергии может браться, так сказать, даром: при ударном разрушении обрабатываемого материала обычно выделяется значительное тепло. В ряде случаев, однако, борьба с этим теплом превращается в серьезную проблему.

Широкое распространение получили вибромельницы в химической промышленности. С их помощью осуществляется химическое взаимодействие между различными средами, механкрекинг полимеров и многие другие операции.

Виброударные процессы, способствующие измельчению материала, возникают, разумеется, не только при его взаимодействии с обрабатываемыми телами, но и при соударении его частиц со стенками камеры и между собой. Поэтому

вибрационное измельчение может происходить и без привлечения обрабатываемых тел (самоизмельчение).

Близкие «родственники» вибромельниц — вибродробилки. Эти машины используют в горнорудной промышленности для дробления кусков добываемой руды; используют их в строительстве. В щековых виброударных дробилках куски разрушаемого материала помещены между массивными телами — корпусом камеры дробления и щекой, приводимой в движение вибровозбудителем. Таким образом, корпус становится как бы наковальней, а щека — разбивающим молотом.

Виброударное формование. Железобетонные изделия состоят, как известно, из стальной арматуры, расположенной внутри застывшей бетонной смеси. В свою очередь, бетонная смесь — это вода, цемент и специальные наполнители, например щебень, керамзит, песок. Формование из железобетона изделия — это придание ему требуемой формы. Дело оказывается не столь простым, как кажется. Чтобы качество работы было как минимум приемлемо, нужно удалить из смеси избыточные пузырьки воздуха, добиться компактной укладки зерен заполнителей, заставить бетонную смесь заполнить впадины формы и находящейся сверху пригрузочной плиты. Не следует также забывать, что речь идет о системах огромной массы: иногда необходимы железобетонные конструкции в десятки тонн. А если к этому добавить, что при получении особо прочных железобетонов приходится иметь дело с жесткими бетонными смесями, представляющими собой сыпучую или рыхлую массу, то становится ясным, что современные формовочные машины должны отвечать весьма высоким требованиям.

Вибрационные формовочные машины, работающие в виброударном режиме, бывают нескольких типов: вибрационные площадки, формовочные установки, виброштампы и др. В этих машинах вследствие совместного действия ударов и вибрации смесь уплотняется из-за снижения сопротивления среды деформированию. Поэтому под действием сравнительно небольших сил — тяжести или давления пригрузки — достаточно легко выталкиваются пузырьки воздуха, правильно укладываются зерна заполнителя, смесь входит во все необходимые впадины, а стало быть, достигается нужный результат.

Заводы железобетонных изделий чаще всего оборудованы виброплощадками и формовочными установками. Виброплощадка — это машина, у которой рабочая форма с изготавливаемым изделием устанавливается на одном или нескольких специальных столах. Вибропривод заставляет стол вибрировать, в результате чего устанавливаются периодические колебания, сопровождающиеся ударами. Формовочные установки проще по конструкции; принцип их работы аналогичный.

Грузоподъемность современных формовочных машин достигает десятков тонн. При этом частота следования ударов — в пределах нескольких десятков герц, суммарные мощности приводных двигателей могут превышать 100 кВт.

В литейном производстве для изготовления литейных форм и стержней также не обойтись без формовочных машин ударного действия. Смеси, из которых изготавливают формы и стержни, состоят из кварцевого песка, глины и воды. Часто в них добавляют синтетические смолы и другие связующие вещества. Технологический процесс здесь во многом сходен с процессом формования железобетонных изделий, однако, разумеется, существует своя «литейная» специфика. В частности, для отвода газов литейные формы должны иметь высокую газопроницаемость; у них, вообще говоря, меньшие массы и габариты. Существуют и другие факторы, влияющие на конструктивные особенности литейных формовочных машин.

Для уплотнения формовочных смесей используют как виброударные, так и редкоударные процессы. Грузоподъемность виброударных прессовых машин до 0,5 т, производительность около 200 форм в час. Редкоударные встряхивающие машины работают на низких частотах, измеряемых долями герца. Существуют ударные формовочные машины и других типов.

Ударные процессы, используют в литейных цехах и при извлечении отливок из опок — жестких металлических рам или открытых ящиков, в которых литейные формы сначала формуются, а затем заливаются металлом. Опоки, устанавливаются на специальные приспособления — выбивные решетки. Вследствие их вибрации опоки начинают подпрыгивать и ударяться, благодаря чему отливки и выбиваются.

Ударные явления в сыпучих средах. Эффективность ударных процессов при формовании определяется сложными динамическими процессами в средах с наполнителями. Общей механической теории таких сред пока не существует, как не существует и общей теории более простых сыпучих сред, о которых следует поговорить специально.

Сыпучую среду (песок, различные порошки, зерно, размельченную руду и многие другие материалы и продукты) можно представить себе в виде системы твердых частиц, находящихся друг с другом в постоянном контакте. Практически любое движение такой среды сопровождается соударениями этих частиц, и, следовательно, любой технологический процесс с ее участием неизбежно связан с ударами. При соударениях частиц сыпучей среды вследствие передаваемой им вибрации среда вначале уплотняется, а при увеличении уровня возбуждения переходит в состояние виброкипения с присущим ему разрыхлением и интенсивным перемешиванием. В сыпучих средах действуют весьма сложные механизмы рассеяния энергии, определяемые ее потерями при столкновении частиц и силами внутреннего трения, зависящими от влажности, размеров и форм частиц, а также других менее тривиальных факторов.

Учет и полезное использование ударных процессов оказываются принципиальными для большинства технологических операций, в которых участвуют сыпучие среды. Например, вибротранспортированию — перемещению различных сыпучих грузов по грузонесущим органам вибротранспортных машин под действием, обеспечивающим транспортирование вибрации — наиболее присущи режимы движения с подбрасыванием: частицы транспортируемых сыпучих веществ находятся в непрерывном виброударном режиме, и удары оказываются фактором, определяющим динамику технологического процесса.

Большую роль виброударные режимы играют и в других вибрационных технологических процессах с участием сыпучих сред и в некотором роде подобным этим средам большим совокупностям небольших металлических изделий. Сюда относятся: вибросепарация — очистка сырья от примесей, сортирование, разделение на фракции, виброориентирование штучных изделий, автоматическая вибросборка деталей и др.

Специальные приемы конструирования и настройки вибромашин позволяют реализовывать виброударные режимы движения с большим технологическим эффектом. В зерноперерабатывающей промышленности, например, применяют сортировочные падди-машины. («Падди» по-английски обозначает необработанный рис-сырец.) Очистка зерен в этих машинах происходит благодаря многократному взаимодействию со специально расположенными на вибрирующей наклонной плоскости жесткими стенками. Оказывается, что при некоторых условиях можно обеспечить такой режим работы падди-машины, что зерно разделится не только на основную культуру и шелуху, но и каждая фракция будет транспортироваться в

своем направлении: одна — вверх по наклонной плоскости, другая — вниз.

Виброударные ручные машины. Эффективность виброударных машин, естественно, наталкивает на мысль вооружить ими рабочих, занятых ручным трудом. Современные промышленность и строительство располагают ручными виброударными машинами самых разнообразных конструкций. В машиностроении, например, применяют гайковерты и шуруповерты, при помощи которых собираются и разбираются резьбовые соединения; широко используются разнообразные виброударные молотки для клепки, чеканки, обрубки отливок, обивки окалины и многих других операций.

В строительстве ручные виброударные машины разрушают прочные грунты, асфальт, бетон, пробивают проходы и ниши, сверлят отверстия, забивают костыли и т. д. В горной промышленности отбойные молотки и перфораторы необходимы для бурения скважин и шпуров. Во многих производствах используют ручные трамбовки, с их помощью уплотняют грунт или формовочные смеси в литейных цехах. При обслуживании железных дорог для выправки путей применяют ручные шпалоподбойки.

Перечень этот можно продолжить, однако уже из сказанного ясно, насколько велик диапазон применения ручных ударных машин. Они незаменимы, когда в силу каких-либо обстоятельств невозможно использовать стационарные устройства.

По характеру работы ручные машины можно разделить на две большие группы. К первой относятся орудия с поступательными ударами — отбойные, клепальные, зачистные и другие молотки, ручные трамбовки, перфораторы, шпалоподбойки и т. д. Вторая группа — машины с вращательными ударами: гайковерты, ударно-сверлильные устройства и т. п. Появляются виброударные ручные машины с несколькими возможными режимами работы — ударно-поступательными, ударно-вращательными и др.

Наиболее распространены машины с пневматическим и электрическим приводами. Пневматический привод чаще используется на предприятиях со стационарной сетью сжатого воздуха, а также в дорожном строительстве и горной промышленности. В пневматических виброударных молотках под действием специально распределенного давления сжатого воздуха задается возвратно-поступательное движение достаточно массивному ударнику, он передает свою энергию рабочему инструменту. При помощи пневмоприводов работают ручные виброударные машины многих типов.

Зачастую ручные машины приводятся в действие электродвигателями. Частота ударов в электрических молотках, ломах, перфораторах 10—50 Гц. Наиболее популярны ручные электрические машины с компрессионно-вакуумным виброударным механизмом (молотки, трамбовки и т. д.). Электрический двигатель заставляет работать поршень, создающий в рабочей камере сначала вакуум, а затем компрессию. Перепад давления приводит в действие боек, который ударяет по рабочему инструменту. В некоторых ручных электрических машинах применяют электромагнитный способ возбуждения. Здесь боек, совершающий возвратно-поступательные движения, является якорем электромагнита.

Библиографию по вопросам, связанным с ручными виброударными машинами, можно найти в справочнике см. в Справочнике «Вибрации в технике».

Ручные виброударные машины, к сожалению, передают вибрацию непосредственно работающим с ними людям. По сведениям медиков до 85% заболеваний вибрационной болезнью связано именно с использованием ручных вибромашин, особенно ударного действия. В последние годы были успешно внедрены в производство ручные многие виды вибробезопасных машины.

В числе прочих были разработаны устройства, в которых виброударные процессы заменяются редкоударными. У редкоударных гайковертов, например, частота ударов 0,5—3 Гц, и это существенно снижает интенсивность вибрации, действующей на рабочего. Эффективность же работы в данном случае не понижается: редкоследующие удары вкладывают в систему значительную энергию, позволяющую осуществить прочное резьбовое соединение за 5—15 ударов вместо 100—200 при использовании виброударного процесса.

К ручным виброударным машинам можно отнести и ультразвуковые переносные установки. Принцип их действия подобен стационарным, однако малая масса и габариты позволяют использовать их там, где применение более громоздких систем неудобно: для маркировки хрупких материалов, гравирования стеклянной химической посуды, приборов и т. п.

Удары, гасящие вибрацию. Рассмотрим теперь устройства, применяемые в различных отраслях техники для гашения нежелательных колебаний элементов машин и конструкций. Предположим, что мы наблюдали за некоторой точкой какой-либо конструкции и установили, что она совершает колебания с недопустимо большой амплитудой. Мы можем тогда, желая как-то подавить эти колебания, поступить следующим образом. Присоединим к колеблющейся точке небольшое тело с полостью, внутри которой находится металлический шарик. Оказывается, при определенных условиях колебания интересующей нас точки резко уменьшатся. В этом случае говорят об ударном гашении вибрации, а присоединенное устройство называют динамическим ударным виброгасителем.

Эффект динамического гашения колебания обусловлен тем, что при присоединении виброгасителя изменяется структура всей колеблющейся конструкции. В частности, достаточно сложно перераспределяются ее резонансные частоты, и при соответствующем выборе параметров гасителя создается ситуация, при которой работа внешних сил, тратившаяся раньше на поддержание сильных колебаний конструкции, используется теперь для установления интенсивного виброударного режима внутри виброгасителя. Другими словами, шарик в полости как бы дает конструкции раскачаться, потому что система перестроилась так, что приходится раскачиваться ему самому.

Следует подчеркнуть: настройка и выбор параметров ударного виброгасителя — вещь отнюдь не тривиальная. Если не будут соблюдены некоторые важные правила, присоединение виброгасителя не принесет никаких полезных результатов, и именно поэтому мы и говорили выше об «определенных условиях», необходимых для виброгашения.

Методы настройки и анализа работы ударных гасителей различных конструкций приведены в. Интересно отметить, что успешной работе динамических гасителей вовсе не способствует рассеяние энергии при ударе. Наоборот, чем меньше ее рассеивается, тем лучше гасятся колебания. Этот, может быть, несколько парадоксальный вывод следует из того, что гашение здесь происходит динамическим путем благодаря перестройке резонансных процессов, а рассеяние энергии эти процессы подавляет и, значит, в частности, ухудшается качество виброгашения. К сожалению, несмотря на то, что этот парадокс давно объяснен и теоретически и экспериментально, до сих пор в литературе можно встретиться с высказываниями, что ударное виброгашение происходит в связи с рассеянием энергии. Снова подчеркнем: не в связи, а вопреки!

Ударные виброгасители были изобретены в 30-е годы нашего века. Они оказались более эффективными, чем существовавшие, поэтому довольно быстро

стали широко применяться. Преимущества такого способа особенно отчетливы, когда необходимо погасить колебания с меняющейся частотой. В то время как другие виды виброгасителей оказываются малоэффективными, ударные справляются с задачей весьма успешно.

В настоящее время запатентовано множество самых разнообразных конструкций ударных гасителей колебаний. Их применяют для поглощения вредной вибрации лопаток турбин, элементов конструкций летательных аппаратов, станков и многих других важных объектов. Принципы ударного виброгашения нашли применение и в строительстве: оказалось, например, возможным использовать их для подавления колебаний башенных сооружений,

...И другие. По вполне понятным причинам на страницах этого короткого обзора невозможно рассказать о всех типах технологических машин ударного действия. Мы лишь вскользь упомянули о горных машинах — разделе техники, требующем самостоятельного освещения. Практически ничего не было сказано о процессах виброобработки, вибросборки, виброупрочнения. Не говорилось и о таких традиционных областях применения удара, какковка, штамповка и т. п. Словом, если считать надо обзор некоторым перечислением, заканчивающимся словами «и другие», то, очевидно, здесь скрыто еще немало ценной информации и наш рассказ следовало бы продолжить. Мы не ставим, однако, цели создать популярный справочник, и поэтому разумнее всего, пожалуй, остановиться и немного проанализировать сказанное.

Легко обнаружить две основные тенденции в применении ударных процессов. Первая — создание «радикальных» машин, т. е. машин, забивающих, разрушающих, раздробляющих, использующих колоссальную мощь ударных явлений.

Вторая тенденция связана с тонкими динамическими эффектами, сопровождающими соударение тел. При работе падди-машины эффект разделения фракций достигается благодаря весьма сложным динамическим процессам в сыпучей среде. При вибротранспортировании или формовании бетонной смеси удары практически ничего не разрушают (по крайней мере суть их действия не в разрушении), а между тем и здесь технологический эффект достигается благодаря им. При работе ударного виброгасителя его эффективность опять-таки не связана со «всепобеждающей ударной мощью», но она всецело определяется именно характером виброударных режимов движения. Итак, вторая тенденция состоит в использовании динамических эффектов, сопровождающих ударные процессы.

Впрочем, уж так ли неразделимы эти две тенденции? Коль скоро мы хотим создать «радикальную» машину, не может вызвать возражение желание сделать ее максимально «радикальной». А это может стать возможным только при условии настройки ее в резонанс, т. е. введения машины в некое специфическое динамическое состояние, при котором работа ее привода расходуется в основном на восполнение потерь энергии при трении. Движение же исполнительного органа машины происходит по наиболее естественному для него закону и не сопровождается бессмысленным преодолением его собственной инерции.

Итак, машину надо научиться настраивать. И здесь наиболее рациональный путь — изучить ее динамику.

Всего несколько слов о расчете ударных машин. Строго говоря, рассказывать о расчете, не приводя примеров, — задача в некотором роде бессмысленная. Можно, однако, кратко прокомментировать существо дела.

Расчеты любой машины, в том числе и ударного действия, «покоятся на двух китах». Первый — выбор расчетной модели, второй — вычисления на основе этой модели, в

результате которых предполагается получить, возможно, более полную информацию о предполагаемом поведении машины в различных условиях работы и зависимости этого поведения от определяющих параметров конструкции.

Составление расчетной модели — искусство инженера. Инженер должен представить себе многое: какие факторы определяют процесс, реализуемый машиной, как организованы связи различных ее узлов и подсистем, каковы критерии качества ее работы. И представив это, в соответствии с законами механики и физики составить специальные соотношения (дифференциальные уравнения), в которые все выявленное им должно войти в виде математических символов. Если что-либо существенное не войдет в математическую модель, то на втором этапе получится результат, не представляющий ценности, а если в математическую модель заложить слишком многое, то тоже ничего хорошего не получится: результат может оказаться трудно интерпретируемым и малоинформативным — за деревьями не будет видно леса.

Бывают случаи, когда анализ, предворяющий процесс расчетного моделирования, приводит к красивым и неожиданным результатам, проясняющим во многом существо Дела еще и до получения окончательных решений. Мы говорили, например, о ручных виброударных гайковертах. Рабочие органы этих машин совершают сложнейшие движения, например винтовое, с вращательными ударами. И вот оказывается, что расчетная схема такой системы приводит к соотношениям, описывающим, в частности, движение в такой распространенной уличной картине: «маленький мальчик бежит вдоль решетчатой ограды и стучит палкой по ее прутьям». Интересно, что это; — не поверхностная аналогия, а именно существо дела.

Проведение вычислений — искусство расчетчика. Дифференциальные уравнения, описывающие движения ударных машин, особенно трудны. Они содержат сложные по своей структуре функциональные зависимости, отражающие резкие скачки скоростей при ударе, нетривиальные механизмы рассеяния энергии, волновой характер ударных процессов и многие другие феномены. Разработаны специальные методы решений, позволяющие с достаточной точностью получить искомую информацию и провести полный расчет ударной машины с учетом свойств привода и рабочего процесса.

К сожалению, пока далеко не все машины рассчитываются с требуемой полнотой, и это пагубно отражается на их качестве. Расчет — основа создания производительной и надежной техники.

Резонансные машины — техника XXI века. Как ни печально, мы не можем точно предсказать, какова будет техника грядущего столетия. Однако некоторые ее черты довольно легко просматриваются уже сейчас. Не вызывает, например, сомнений, что машины завтрашнего дня будут эффективными, и при минимуме энергетических затрат они, конечно же, покажут максимум производительности. Это касается и будущих машин виброударного действия.¹

Здесь мы расскажем о некоторых таких машинах — их внедрение еще только начинается или готовится.

Эффективность виброударной машины. Каким образом можно представить себе общую динамическую схему виброударной машины, например вибромолота или ультразвуковой установки для резания?

Во-первых, любая подобная машина состоит из исполнительного рабочего органа, который, собственно, и действует на обрабатываемый объект. Во-вторых,

¹ Хотя то, о чем будет сейчас говориться, остается верным для многих других классов вибрационных машин; мы не будем здесь выходить за границы, установленные темой этой работы.

неотъемлемой частью каждой машины является привод (двигатель, передача, система управления) — устройство, создающее силовое воздействие, которое и заставляет машину двигаться.

Таким образом, можно записать «формулу»: машина = привод + исполнительный механизм. Иногда при грубых расчетах первым членом в правой части этой формулы пренебрегают и машину отождествляют с исполнительным органом. Это ведет к существенным (и потому приятным) упрощениям в расчетах, но очень часто оказывается источником неверного *понимания существа дела*. Современные теории, как правило, рассматривают привод в качестве неотъемлемой части машины, что помогло существенно продвинуться в деле создания принципиально новой высокоэффективной техники.

Какие же машины следует считать эффективными, а какие нет? На этот, казалось бы, простой вопрос ответить не так уж и просто. Вначале нужно договориться о терминах: например, что мы понимаем под термином «эффективная машина»?

Можно предположить: эффективная машина — это та, которая наиболее хорошо справляется со своей технологической задачей. Для большого числа виброударных машин наибольшая эффективность, очевидно, связана с наибольшей ударной силой, развиваемой рабочим органом. Чем больше эта сила, тем «более глубоко», «более плотно», «более рыхло», «более быстро», словом, «более хорошо».

Но способов увеличения ударной силы может быть несколько. Можно оснастить машины сверхмощными приводами — и, пожалуйста, величина ударной силы будет сколь угодно большой. Однако вряд ли кто-нибудь связывает представления о технике будущего с громоздкими металло- и энергоемкими машинами, пусть даже легко справляющимися с технологическими задачами. Очевидно, необходим иной, не столь «лобовой» путь, и эффективными следует считать машины, которые наиболее хорошо справляются со своими технологическими задачами, тратя при этом минимум энергетических ресурсов. Подобным требованиям удовлетворяют резонансные машины.

Выше мы видели, что амплитуда колебаний рабочего органа имеет максимальное значение при достижении частотой возбуждения некоторого резонансного значения, отличающегося от значения собственной частоты системы. При максимальных амплитудах рабочего органа в обрабатываемую среду «вкачивается» максимально возможная мощность, и, следовательно, у машины, рабочий орган которой находится в резонансном состоянии, максимальная эффективность. При работе виброударной машины в резонансном режиме привод действует с наибольшей полезностью, и, потребляя от внешних источников сравнительно небольшую энергию, он получает возможность расходовать ее наиболее разумно. Энергия тратится только на восполнение неизбежных потерь на трение и полезную работу, но не на навязывание рабочему органу типа движения: при резонансе он движется как бы в идеальных условиях мира без трения, его движение определяется лишь его собственными свойствами. Этим резонансные машины выгодно отличаются от своих «нерезонансных» собратьев. Если раньше для повышения эффективности работы приходилось увеличивать мощность привода, то теперь для достижения нужного технологического эффекта сама работа организуется так, что из машины «выжимается» предельно возможная мощность. Сверхмощные двигатели и большая внешняя энергия оказываются излишними и, конечно, снижаются материалоемкость и размер машины. Все это обосновано достаточно разработанной теорией и получило убедительные практические подтверждения.

Механика резонансных виброударных машин очень красива и поучительна; часто она заставляет пересмотреть заново, казалось бы, давно устоявшиеся положения.

Например, издревле принято говорить, что лучшие машины — это те, которые имеют наибольший коэффициент полезного действия. Ниже мы увидим, что эта «классическая» точка зрения, вообще говоря, неправильна.

Для организации резонансных режимов необходима довольно тонкая настройка машины. Работа привода организуется так, что усилие, передаваемое на исполнительный орган, действует в фазе со скоростью его движения, и при этом наиболее острой становится задача стабилизации системы в резонансном состоянии: удержать подобную фазировку весьма сложно, неизбежно возникающие в процессе работы изменения параметров системы срывают резонансные режимы и эффективность работы теряется.

Таким образом, за эффективность приходится платить. Плата эта, впрочем, не чрезмерно высока, ибо организация системы управления, стабилизирующей резонансные режимы работы, при современном уровне развития механики и электроники не представляет большого труда. Другое дело, что тонкая настройка машин и создание систем их стабилизации и управления требуют принципиально нового подхода: машины приходится не только конструировать, но и искусно настраивать. Здесь инженерам приходят на помощь современные научные концепции, изучение и внедрение которых быстро принесут ощутимые плоды.

Весьма плодотворной представляется концепция конструирования машин по так называемой авторезонансной схеме. С ее сутью мы познакомимся ниже, а сейчас лишь заметим, что при авторезонансе рабочий орган виброударной машины вне зависимости от значений параметров ее работы все время находится в режиме наиболее интенсивных колебаний. Таким образом, при авторезонансе машина автоматически выбирает наиболее эффективный режим работы.

Резонансные вибромолоты и вибротрамбовки. В настоящее время для стабилизации резонансных режимов вибромолотов, вибротрамбовок и других машин, с которыми мы познакомимся в предыдущей главе, разработаны специальные системы автоматического регулирования. Машины, оснащенные такими системами, не только производительнее традиционных, но и существенно удобнее в эксплуатации: вследствие автоматизации отпадает необходимость в ручной настройке и значительно увеличивается безопасность работ.

Посмотрим, на каких принципах должны строиться системы автоматической стабилизации резонанса. Прежде всего, напомним, что виброударный резонанс — явление чрезвычайно капризное, так что оптимальная настройка машины будет различной для различных условий работы. Например, при трамбовании грунта в зависимости от его состояния и качества в данном месте оптимальная настройка трамбовочной машины может меняться весьма существенно. И при забивке свай, оказывается, оптимальные настройки вибромолота в начале и в конце забивки заметно отличаются друг от друга.

Выбор параметров машины, подлежащих регулированию, достаточно разнообразен. Распространена следующая схема. При уменьшении эффективности работы машины система регулирования вырабатывает управляющий сигнал, подаваемый после некоторых преобразований на двигатель машины. Если, например, виброударный режим возбуждается при помощи электродвигателей с установленными на них неуравновешенными вращающимися массами (дебалансами), такой управляющий сигнал вызывает изменение скорости вращения дебалансов, и поэтому на нужную для поддержания резонансного режима величину изменяется частота колебаний исполнительного органа машины.

В качестве меры эффективности работы машины может быть выбрана величина ударной силы или какие-либо величины (энергия, импульс удара), однозначно с

ней связанные. На резонансе ударная сила максимальна, однако, как мы знаем, заранее неизвестно, каково может быть ее значение при различных условиях работы. Поэтому необходимо найти такую характеристику движения, о которой гарантированно известно, что некоему ее фиксированному значению как раз и отвечает максимум силы удара. Эта характеристика — сдвиг фаз между возбуждающей силой и скоростью движения исполнительного органа машины. Уже из простых рассуждений видно, что наиболее разумно «организовать» действие силы возбуждения так, чтобы она «работала» в такт с движением исполнительного органа, т. е. была бы синфазна с его скоростью. Таким образом, при резонансе сдвиг фаз между силой возбуждения и скоростью исполнительного органа равен нулю.

Системы автоматического регулирования, стабилизирующие резонансные режимы, строятся, поэтому следующим образом. С помощью специальных электронных устройств организуется постоянно действующее наблюдение за сдвигом фаз между скоростью движения рабочего органа машины и силой возбуждения. Если сдвиг фаз принял ненулевое значение (машина «отошла» от резонанса), немедленно формируются управляющие воздействия как следствие, обращающие сдвиг фаз снова в нуль.

Схемы организации работы виброударных машин, подобные описанным, характеризуются одним принципиальным общим свойством: в каких бы условиях ни работала машина, ее деятельность оптимальна. Стабильность работы достигается благодаря обратной связи; на основании информации о характере движения исполнительного органа формируются воздействия, управляющие двигателями.

Рассмотрим более сложные резонансные машины. Несмотря на конструктивное разнообразие, почти все они имеют сходство, определяющееся их авторезонансной настройкой.

Авторезонансная настройка ультразвуковых виброударных машин. В предыдущей главе мы познакомились с ультразвуковыми технологическими машинами для резания сверхтвердых и хрупких материалов. В таких машинах технологический эффект достигается благодаря ударам инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой, по частицам абразива, оседающим из суспензии на обрабатываемую поверхность. Результат — образование полости, повторяющей конфигурацию инструмента.

У выпускаемых в настоящее время ультразвуковых установок есть недостатки. В частности, весьма заметна их низкая производительность, определяемая скоростью резания. На скорость резания существенно влияют два фактора (вообще говоря, их больше, но эти два наиболее важны при настройке машины) — усилие, с которым инструмент прижимают к обрабатываемому изделию (его называют «усилием подачи»), и амплитуда колебаний инструмента. Оба этих параметра — «союзники» производительности станка, но между собой они «ладят» очень плохо. В современных ультразвуковых установках увеличение усилия подачи уменьшает амплитуды колебаний. Причина тому — свойства виброударных систем. Большинство ультразвуковых станков настраивают в рабочее состояние на холостом ходу, т. е. в том случае, когда виброударные режимы еще не начались. Поскольку станки работают под нагрузкой — это их функция, — такая настройка бесполезна; удары, интенсивность которых с увеличением усилия подачи нарастает, полностью изменяют динамику системы. В частности, существенно изменяется резонансная частота, и поэтому амплитуда колебаний, достаточно большая на холостом ходу, при работе под нагрузкой резко падает. Установка может функционировать нормально только при весьма небольших усилиях подачи — это и объясняет малую скорость резания.

Теоретические и экспериментальные исследования и данные по эксплуатации

промышленных образцов ультразвуковых станков показали, что при существующих системах настройки единственный путь увеличения эффективности — повышение мощности системы. Но этот путь, как мы уже неоднократно отмечали, весьма ненадежен. Вряд ли в наше время позволительно впустую расходовать энергетические и материальные ресурсы. Стало быть, резервы эффективности необходимо искать прежде всего в самих машинах.

В Институте машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ) разработали системы управления, резко повышающие эффективность работы ультразвуковых виброударных установок. Принцип их действия основан на организации работы станка в авторезонансном режиме. Авторезонанс — это резонанс под действием силы, порождаемой движением самой системы. Физическое содержание понятия легко пояснить при помощи такого «бытового» примера.

Представьте себе, что вы посадили на качели маленького ребенка, который самостоятельно раскачиваться еще не умеет, так что придется поработать вам самим. Качели — прекрасный экспериментальный стенд для демонстрации различных резонансных явлений; в описываемой ситуации, например, возникает авторезонанс. Руку, которой вы «качаете», посчитаем приводом, сами качели — колебательной системой, а органы чувств (зрение и осязание) в совокупности с центральной нервной системой — управляющим звеном. Когда режим можно будет считать периодическим (дети любят качаться долго), вы обнаружите, что темп качания (частота колебаний) неодинаков для различных амплитуд и каждой амплитуде колебаний будет соответствовать определенная частота. Ситуация такова: под контролем органов чувств рука движется все время в направлении движения качелей (то есть синфазно со скоростью), а если вы попытаетесь увеличить или уменьшить амплитуду качания, то придется соответственно уменьшить или увеличить частоту колебаний. Это типичный пример авторезонанса. Здесь система управления, работающая вполне автоматически (машинально), задает приводу (руке) такой ритм качания, что она (рука) двигается синфазно со скоростью: так устанавливается оптимальный режим. Выключение управления (предположим, кто-то внезапно вас окликнул и вы отвлеклись) немедленно скажется: авторезонансный режим прекратится, чтобы поддерживать ту же амплитуду при нарушении синфазности, потребуются гораздо более ощутимые мускульные усилия. Энергетические «льготы», предоставляемые авторезонансом, станут вам ясны моментально.

Аналогичные механизмы, кстати, действуют и во многих других системах. Так регулируется работа сердечно-сосудистой системы, так работают хорошо всем известные часы. Вернемся, однако, к ультразвуковым машинам.

Организация авторезонансной системы возбуждения была связана в данном случае с решением нетривиальных проблем как теоретического, так и чисто практического содержания. В разработанной схеме есть специальная система обратной связи. В нее входят пьезоэлектрический микрофон, воспринимающий ультразвуковые волны и выполняющий роль датчика, который следит за колебаниями инструмента, и ряд электронных устройств. Их деятельность и гарантирует постоянство резонансного сдвига фаз, при которой производительность машины наивысшая. В силу свойств авторезонанса интенсивные колебания инструмента самовозбуждаются и поддерживаются в широком диапазоне рабочих нагрузок. Таким образом, работа автоматизируется; при включении установка сама выходит на оптимальный режим.

Авторезонансная схема автоматической настройки ультразвуковых станков помогла совместить, казалось бы, плохо совместимое; поддерживает значительные амплитуды колебаний инструмента при значительном усилии подачи; она

поддерживает авторезонансные режимы и в случае других изменений параметров машины и технологического процесса. Так, в широких пределах может изменяться жесткость изделия, инструмент может быть спроектирован с припуском на износ и т. д.

Следует подчеркнуть, что авторезонансная настройка улучшает производительность машины в несколько десятков раз: в автоматическом режиме допустимое усилие подачи может в 40 раз превышать возможное сейчас, а скорость резания — более чем в 30 раз. Не следует думать, однако, что система автоматической настройки столь сложна, что для нее требуется компьютер или по крайней мере микропроцессор. Это всего лишь несколько достаточно простых электронных схем, и не более того. Главное здесь механика, обеспечивающая правильную настройку машины.

В связи с механикой резонансных машин интересно поговорить о таком старом «механическом понятии», как коэффициент полезного действия.

КПД резонансной машины. Мы убедились, что резонансные машины максимально эффективны. Интересно разобраться: имеют ли резонансные машины высокие КПД и связана ли их высокая эффективность с этой классической характеристикой?

По определению КПД есть выраженное в процентах отношение мощности, расходуемой машиной на выполнение технологической задачи (обозначим ее N_1) к суммарной мощности, затраченной приводом. Эта суммарная мощность состоит из двух слагаемых. Первое - все та же мощность N_1 второе — мощность рассеивания в системе ввиду неизбежных потерь энергии на трение и другие факторы (N_2). Таким образом, $\text{КПД} = [N_1 : (N_1 + N_2)] \cdot 100\%$

Величина N_1 , определяет, как мы условились, мощность, затраченную с пользой. В ультразвуковом станке — это мощность, расходуемая на резание, т. е. которая тратится на преодоление сопротивления обрабатываемой среды воздействию инструмента. Пусть станок работает так, что величина N_1 очень велика. Тогда, при обычных потерях энергия в самой машине N_1 много больше, чем N_2 , и, следовательно, $N_1 + N_2 \approx N_1$, потому что величиной N_2 можно попросту пренебречь. Из нашей формулы получается, что в этом случае $\text{КПД} \approx 100\%$. Это вроде бы очень хорошо, но подождем радоваться. Прикинем, какова может быть эффективность такой машины? Раз величина N_1 велика и сопротивление обрабатываемой среды очень большое, то амплитуда колебаний инструмента будет чрезвычайно малой: в таких условиях амплитуда как бы «подсаживается», Это означает, что весьма малой, практически нулевой будет скорость резания, а вместе с ней и эффективность машины.

Естественно, ничего хорошего не будет и в том случае, когда очень велики бесполезные потери энергии N_2 . Здесь $\text{КПД} \approx 0\%$ и амплитуда колебаний инструмента снова очень мала: практически вся энергия расходуется впустую. Такова ситуация в современных ультразвуковых станках — их КПД не превосходит нескольких процентов.

Итак, в двух предельных случаях при $\text{КПД} \approx 100\%$ и $\text{КПД} \approx 0\%$ работа машин неэффективна. Можно ожидать поэтому, что имеется некоторый оптимум и при каком-то промежуточном значении КПД эффективность максимальна. Для ультразвуковых станков, настроенных в резонанс, реализовать предельные возможности можно при $\text{КПД}=50\%$ [4, с. 25—27]. Здесь оказываются согласованными затраты мощности на преодоление сил трения и сил сопротивления обрабатываемой среды ($N_1=N_2$), и именно в этом случае можно достичь предельной скорости резания. Большие или меньшие КПД соответствуют нерезонансным настройкам.

Таким образом, для резонансных машин КПД, вообще говоря, — неудобная характеристика, и меру их эффективности лучше выражать другими величинами. Собственно, так и делается: в теории резонансных машин вводится в рассмотрение так называемый коэффициент эффективности, равный нулю для неэффективных машин и ста процентам для машин, настроенных в резонанс

Виброударное устройство для измерения сил. До сих пор мы говорили о резонансной настройке машин, достаточно давно апробированных производством и строительством. Главная задача — «выжать» их предельные возможности. Существует, однако, другой класс виброударных машин и устройств. Представители его — новейшие разработки Института машиноведения РАН, а также ЗАО «Национальная Технологическая Группа» — в принципе не рассчитаны на иные, кроме как на резонансные, настройки.

Посмотрим, как с помощью резонансных виброударных процессов можно организовать сверхточное измерение сил в различных механических устройствах. В частности, речь может идти о «резонансном виброударном взвешивании».

Старинные пружинные весы... Они измеряют силу веса. Упрощенно можно сказать так: берется пружина, один конец которой закреплен, а другой свободен; к свободному концу присоединяют некоторое тело и, следя за деформацией пружины, производят взвешивание. Чем больше пружина растянулась, тем больше вес; это известно всем. Но сегодня, когда современное производство требует все больше точности и не только точности, а и быстродействия, с тем чтобы за короткий срок можно было бы определить вес большого числа каких-либо тел, «старые» способы измерения неприемлемы.

На смену статике пришла динамика. Собственной частотой колебательной системы, состоящей из упругой пружины и массивного тела, называется величина $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$, где c — упругость, m — масса тела. Если приложить к такой системе синусоидальную силу периода $T_0 = f_0^{-1}$ то возникает резонанс, и ее колебания станут весьма интенсивными даже при малой амплитуде вынуждающей силы.

Такая колебательная система может служить динамическими весами (и вообще датчиком сил). Если к ней присоединить взвешиваемое тело, то резонансная частота понизится: суммарная масса стала больше. Поэтому новая резонансная частота однозначно определяет вес присоединенного тела. На аналогичном принципе можно измерять и силы другой природы. Точность и быстродействие динамического способа не идут в сравнение со статическим, но все же и здесь имеются существенные недостатки.

Дело в том, что, например, при небольшом весе присоединенного тела резонансная частота может измениться на очень малую, трудно регистрируемую величину, ведь амплитуда колебаний может уменьшиться крайне незначительно; при малом изменении частоты движение качественно сохраняет свой характер. Это хорошо видно на рис. 5: при малом отходе от значения f_0 величина A изменяется также мало. Поэтому чувствительность подобного способа относительно невысока. Не очень велико здесь и быстродействие. Резонансная частота определяется после окончания переходного процесса, появляющегося вследствие присоединения взвешиваемого тела, а время его прохождения в подобных системах может быть достаточно большим.

Способ измерения, о котором мы сейчас расскажем, представляется перспективным для измерения самых разнообразных сил, а не только силы веса,

но для простоты изложения мы ограничимся именно взвешиванием.

Организуем нашу систему так, чтобы между присоединенным телом и колебательной системой типа той, о которой только что говорилось, возникли интенсивные периодические соударения. Если, изменяя частоту возбуждения колебаний, ввести систему в резонансный виброударный режим с максимально возможной амплитудой колебаний, то по значению резонансной частоты снова можно однозначно определить искомую силу веса. Но теперь это гораздо проще и, что главное, надежнее.

Взвешивание в виброударном режиме изменит частотные свойства системы. Оказывается, что резонансная кривая имеет здесь вид, аналогичный рис. 15, и, кроме того, теперь взвешивание сопровождается не понижением, а повышением частоты резонансных колебаний. При отходе от резонанса характер движения может измениться качественно (максимальная амплитуда находится на границе срыва колебаний), а возможность получения более резких изменений характеристик движения и определяет в конечном итоге чувствительность системы.

Помимо этого, ввиду повышения частоты колебаний возрастает и темп прохождения переходного процесса, следовательно, заметно возрастает быстродействие.

Техническая реализация описываемого способа достаточно проста. В качестве колебательной системы выбирают, например, пьезокерамическую пластинку, которая при подаче на ее обкладки переменного тока начинает колебаться с определенной периодичностью. К пластинке присоединяют взвешиваемое тело, и, после того как на определенной частоте возбуждаются виброударные резонансные колебания, по значению этой частоты и определяют искомую силу веса. Поддерживать наиболее интенсивные колебания можно с помощью, например, авторезонансной схемы или другими способами. Расчеты показывают, что чувствительность прибора увеличивается более чем в 4 раза.

Описанный способ взвешивания может быть применен в самых различных отраслях промышленности. Например, в фармацевтическом производстве, при взвешивании порошков может возникнуть необходимость в их сверхточной дозировке. Высокие чувствительность и быстродействие способа в сочетании с доступной автоматизацией при помощи авторезонансной настройки дадут возможность построить высокоэффективные и производительные автоматические линии.

Резонансные виброударные сканаторы. Продолжая разговор о новейших достижениях в использовании ударных процессов в технике, мы расскажем сейчас, как эффективно могут здесь сотрудничать физика и механика. Первая «поставляет» оптические квантовые генераторы (лазеры), вторая — приборы для управляемого пространственного перемещения генерируемых ими световых лучей (сканаторы).

Термин «сканирование» происходит от английского слова «scan», обозначающего «пристально разглядывать». При пристальном разглядывании какого-либо предмета зрачок глаза для фиксации внимания на каждой существенной его черте совершает как бы небольшие колебательные движения. Например, от левого края предмета к правому и обратно или как-нибудь по-другому; Вот так и сканаторы. Они дают лазерному лучу поле действия, необходимое для выполнения довольно разнообразных задач. В настоящее время существует немало различных методов сканирования, и среди них одно из важнейших мест занимают оптико-механические. Это обусловлено возможностью получать при посредстве механических приспособлений относительно небольшие частоты движения луча (диапазон — от единиц до тысяч герц), а именно такие частоты в ряде случаев

оказываются особенно важными.

Область производственного применения лазеров, оснащенных оптико-механическими сканаторами, можно разделить на две группы. Во-первых, технологические использования. Световые лучи, генерируемые мощными лазерными установками (2—10 кВт), с успехом применяются при сварке, резке и термообработке (например, закаливании поверхностного слоя) металлов. Во-вторых, использование лазеров в различных контрольно-измерительных устройствах. Здесь применяются маломощные установки (мощность — милливатты), дающие узкий световой пучок с очень малым расхождением лучей.

Рассмотрим, например, резку металла. Режущий луч должен двигаться точно по намеченной траектории. Если, скажем, эта траектория — отрезок прямой, то движение луча, организуемое сканатором, происходит строго по этому отрезку. Как это происходит? Предположим, что на массивное тело (рис. 2) надето зеркало, отражающее свет. Если вызвать прямолинейные колебания системы, то отраженный луч будет «вычерчивать» по поставленной на его пути плоскости отрезок прямой, длина которого пропорциональна амплитуде колебаний. Если луч несет большую энергию, а плоскость — металлический лист, в котором необходимо проделать щель, то задача легко решается. Имеются впрочем, существенные недостатки. Основной — низкая линейность сканирования. В установившемся режиме закон движения сканирующего элемента в графическом представлении — синусоида (рис. 4). Как известно, движение тела по синусоидальному закону неравномерно: оно быстро «промахивает» положение равновесия, а при приближении к амплитудному значению замедляется; в момент достижения этого значения его скорость вообще равна нулю. В рассмотренном примере с резанием световой луч, оказывается, большее время будет пребывать у концов отрезка, и следовательно, прогрев здесь будет существенно сильнее, чем в середине. Это, разумеется, пагубно отражается на качестве работы, что при такой конструкции сканатора неизбежно. Можно упомянуть и о других недостатках: трудности с увеличением частоты сканирования, нестабильность амплитуды колебаний и т. д.

Резонансные виброударные сканаторы лишены перечисленных недостатков [7]. Если в качестве сканирующего устройства применить виброударную систему (рис. 7), то закон движения сканирующего элемента на графике будет напоминать пилу (рис. 13). При этом резко возрастет линейность: отраженный световой луч пребывает в каждой точке отрезка примерно одинаковое время, и, следовательно, прогрев будет равномерным. Стабильной становится и амплитуда колебаний: она все время равна половине зазора, в котором находится сканирующий элемент; специальным образом регулируя этот зазор, можно добиться нужного ее значения. Наконец, организация резонансной настройки позволяет получить достаточно высокие частоты сканирования, что заметно увеличивает быстродействие системы и делает ее при этом высокоэкономичной.

Достоинства резонансных виброударных сканаторов делают их чрезвычайно полезными и при особо точных технологических измерениях. В последние годы в связи с настоятельными требованиями повысить быстродействие и надежность таких измерений все шире распространяются бесконтактные динамические методы, в основе которых лежит принцип сканирования измеряемого объекта. Световой луч гораздо быстрее, чем что-либо другое «пробежится» по измеряемому объекту и с помощью специальной электронной аппаратуры, регистрирующей отраженный или проходящий световой сигнал, сообщит о нем необходимую информацию. Таким

образом, можно контролировать линейные размеры изделий или, например, осуществлять особо точное наведение инструмента. Современные фотоэлектрические микроскопы, оснащенные сканирующими устройствами, позволяют измерять перемещения с поистине фантастической погрешностью, исчисляемой сотыми долями микрометра.

В подобных системах, среди различных оптико-механических сканирующих устройств лучшие параметры опять-таки у резонансных виброударных сканаторов. Разработанные в последнее время методы их тщательной настройки, организации стабилизирующих и корректирующих контуров позволили еще улучшить их динамические характеристики, и следовательно, стало возможным еще больше повысить точность измерений.

Рассмотрим вопрос о дальнейшем увеличении линейности сканирования. Мы видели, что из-за самой, так сказать, «виброударной природы», системы, закон движения сканирующего элемента пилообразный. Вообще говоря, отрезки, из которых состоит эта «пила», не вполне правильны (рис. 13). При ударе массивного тела, несущего сканирующий элемент, о жесткие упоры происходит (в соответствии с теорией удара) почти мгновенная потеря энергии. Поэтому «угол падения» несколько больше «угла отражения», отчего пилообразный закон движения искажается. Один из способов повышения линейности — введение устройства автоматической коррекции, работа которого основана на подаче в систему специальных корректирующих импульсов, строго синхронизированных с ударами. Эти импульсы призваны вернуть сканирующему элементу энергию, потраченную при ударе, и тем самым обеспечить равенство углов «падения» и «отражения».

Разнообразные приложения имеют виброударные сканаторы и при работе с другими источниками излучений, например с ультразвуком. Оптические приборы оказываются весьма «капризными», когда речь заходит о производстве с загрязненной атмосферой. Но там, где с трудом проходит световой луч, легко проникает ультразвук. Если в качестве сканирующего элемента виброударного сканатора выбрать излучатель сфокусированных ультразвуковых волн, измерительные бесконтактные системы можно устанавливать хоть в условиях полной непрозрачности: качество их работы все равно останется высоким.

Нельзя не обратить внимание читателя на довольно большое разнообразие видов резонансных виброударных машин и устройств.

Резонансные машины и гибкие производственные системы. Заканчивая разговор о резонансных виброударных машинах, нельзя не сказать несколько слов об их месте в гибких производственных системах (ГПС). На эти системы возлагаются большие надежды, и на их создание расходуются поэтому большие средства.

Задача ГПС — не только автоматизация, но и быстрая перестройка всего производства на выпуск новой продукции. Системам этим требуется принципиально новая техника, и представляется, что авторезонансные вибромашины займут здесь достойное место.

В самих принципах построения таких машин заложены качества, весьма близкие к «духу» гибких производственных систем. Они могут быстро адаптироваться к новым технологическим задачам, они работают с максимальной производительностью и именно в автоматическом режиме. Наконец, как мы видели, авторезонансные принципы оказываются вообще-то одинаковыми для машин и устройств, казалось бы, никак не связанных друг с другом, а это может существенно облегчить их автоматическое проектирование. Их функционирование, основанное на использовании тонких динамических эффектов, надежно, стабильно и не требует

обращения к сложным механизмам и вычислительным устройствам (это несомненный плюс, так как делает производство более надежным и сильно удешевляет его в целом).

Каждая из систем, о которых мы рассказали выше, может найти свое место в ГПС, где, конечно же, потребуются и автоматические сверхточные измерения, и эффективные способы резки, и автоматизация процессов переноски изделий.

Нельзя не отметить также, что большую роль здесь, могут сыграть и другие машины и технологические процессы, использующие ударные явления: вибротранспортирование, вибросборка и т. п. Так что ударные процессы и авторезонансные принципы организации работы машин, очевидно, встанут в ряд с другими «столпами», на которых будет строиться техника будущего.

И последнее. Интересный все-таки путь прошли такие «простые» и давно известные технические ударные средства. От стенобитных машин, от примитивных каменных топоров до лазерных сканаторов расстояние очень и очень большое. Не так уж много природных явлений так тесно связано с человеком на протяжении всей его истории. И эта связь еще долго не оборвется.

За страницами работы осталось много интересных фактов. Скажем, упор, сделанный на теорию и применение виброударных процессов, не говорит о какой-то их абсолютной монополии. Уже есть свидетельства технического использования редкоударных процессов (мы немного говорили об этом в разделе, посвященном ручным машинам). По ряду причин не были рассмотрены вопросы применения одиночных ударов и т. д.

Однако главная мысль, мы надеемся, все-таки прозвучала теория ударных машин и процессов есть весьма стройная техническая наука. Мы подчеркиваем: наука, а не просто собрание инженерных идей и изобретений. И как наука она помогла от «грубых» ударных машин прошлого перейти к технике совершенно иного качества. Только рассмотрение комплексов «управляемый привод — передаточные и исполнительные механизмы — рабочий процесс» может позволить построить машины, в которых согласованное и кооперативное взаимодействие всех элементов дает радикальный технический эффект.

ЛИТЕРАТУРА К СТАТЬЕ

1. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959, 905 с.
2. Асташев В. К., Бабицкий В. И. Методы повышения эффективности ультразвуковых станков. — Станки и инструмент, 1982, № 3, с. 25—27.
3. Бабицкий В. И., Герц М. Е., Полунов Ю. Л. Способ измерения силы. — Авт. свид. СССР. № 877368, Бюллетень изобретений, 1981, № 40.
4. Андрианов Н.А., Асташев В.К., Крупенин В.Л. Устройство для возбуждения и автоиатической стабилизации резонансных колебаний ультразвуковых систем. Патент РФ № 2350405 // Бюлл. Изобр., 2009, №9.
5. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Волны в распределенных и дискретных виброударных системах и сильно нелинейных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1998. - № 5 - С. 13-30.

6. Асташев В.К., Бабицкий В.И., Вульфсон И.И. и др. Динамика машин и управление машинами: Справочник / Под ред. Г. В. Крейнина. М.: Машиностроение, 1988. 239 с.
7. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем. М.: Наука, 1978. 352 с.
8. Бабицкий В.И., Крупенин В.Л. Колебания в сильно нелинейных системах. -М., Наука, 1985. – 384 с
9. V.I. Babitsky, V.L. Krupenin Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems.- Berlin. Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001. –404 p.p.
10. Бабицкий В. И., Джохадзе Ш. Р., Кобринский А. Е., Коридорф С. Ф., Полунов Ю. Л. Новый сканатор для фотоэлектрических датчиков положения. — Известия вузов, Приборостроение, 1969, № 7, с. 64—67.
11. Крупенин В.Л. О прохождении виброударных процессов через механические фильтры // Проблемы машиностроения и надежности машин. - №6. - 1993 г. С.22-28.
12. В.Л. Крупенин К описанию движения систем общего вида, взаимодействующих через удары с выделенным объектом.// Письма в «ВНТР», 2008, №2 –С. 33 -38
13. Крупенин В.Л. Случайные соударения решетчатой конструкции с периодической структурой и плоским ограничителем хода // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. -№4. С. 105-109.
14. Крупенин В.Л. К исследованию высших нелинейных форм колебаний виброударных систем с распределенными ударными элементами// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. -№4. С. 105-109.
15. Krupenin V L, Transformation of oscillation forms of a string interacting with two extended obstacles . DAN USSR, 1990, V.313, no. 6 (in Russian).
16. Krupenin V.L., Veprik A.M. Vibroconductors equipped with impact elements and distributed vibroimpact systems // Proceedings of the 2-nd European Nonlinear Oscilations Conference. V.1. Czech Prague: CTU, 1996, pp. 229-234.
17. Бауман В. А., Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. М: Высшая школа, 1977, 256 с.
18. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем. М., Наука, 1971. 896 с.
19. Вибрации в технике. Справочник. Т. 3/Под ред. Ф. М. Диментберга, К, С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980 544 с.
20. Вибрация в технике. Справочник. Т. 4/Под ред. Э. Э, Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
21. Вибрации в технике. Справочник. Т, 6/Под ред. К. В. Фролова. М., Машиностроение, 1981. 456 с.
22. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов./Под ред. В. А. Баумана, И, И, Быховского, Б. Г. Гольдштейна. М.: Машиностроение, 1970. 548 с,
23. Кильчевский Н. А. Теория соударения твердых тел. М.—Л.: ОГИЗ ГИТТЛ, 1949. 254 с.
24. Кобринский А. Е., Кобринский А. А. Виброударные системы. М.: Наука, 1973. 591 с.
25. Крупенин В. Л., Вознюк П. Д., Акинфиев Т. С. Генератор спектра вибрации. — Авт. свид. СССР № 1087798, Бюллетень изобретений, 1984, № 15.
26. Крюков Б. И. Динамика вибрационных машин резонансного типа. Киев: Наукова думка, 1967. 210 с.
27. Лесин Л. Д. Вибрационные машины в химической технологии. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1968 80 с.
28. Марков А. А. Резание труднообрабатываемых материалов при помощи ультразвуковых и звуковых колебаний. М.: Машгиз, 1962. 332 с.

29. Нагаев Р. Ф. Периодические режимы вибрационного перемещения. М.: Наука, 1978. 160 с.
30. Нагаев Р.Ф., Ходжаев К.Ш. Колебания механических систем с периодической структурой. - Ташкент: ФАН, 1973. – 272 с.
31. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977. 233 с.
32. Тресвятский А. Н. Ударно-вибрационное сканирование как средство повышения точности технологических измерений. — В сб.: Вибрационная Техника. М.: МДНТП, 1981. 3—8 с.
33. Харкевич А. А. Автоколебания. М.: Гостехиздат, 1954, 170 с
34. Широкополосные виброударные генераторы механических колебаний.// Веприк А.М., Вознюк А.Д., Крупенин В.Л., Чирков И. М. - Л: Машиностроение, 1987.-72 с.

Поступила: 02.03.09.