

## К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРОВ И КОНТАКТОВ В МАШИНАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

В. Ф. ГОРБУНОВ, В. М. РАЗИН, А. В. ТРИХАНОВ

(Представлена семинаром факультета автоматки и вычислительной техники)

При исследовании машин ударного и вибрационного действия возникает необходимость учитывать упругие удары и контакты.

В последнее время для этих исследований стали использоваться средства вычислительной техники, а именно: электронные моделирующие установки [1, 2, 3, 6, 9]. В связи с этим предложен ряд электронных моделей, построенных с учетом ударов. Нами метод электронного моделирования применен для исследования процессов изоляции и гашения вибрации ручных пневматических машин ударного действия. При их работе имеют место следующие удары и контакты.

Боек пневматического молотка периодически наносит удары по хвостовику инструмента. Энергия, переданная бойком инструменту, идет на разрушение обрабатываемого материала тоже ударом. Инструмент перед ударом по нему бойком в зависимости от усилия нажатия рабочего на корпус молотка может находиться как в контакте с обрабатываемым материалом, так и на некотором удалении от него. Корпус молотка воспринимает обратные удары инструмента при отскоке последнего от обрабатываемого материала, а также садится на буртик инструмента при обратном ходе ударника. При значительных отходах корпуса от забоя ударник наносит удары не по хвостовику инструмента, а по передней стенке корпуса.

Таким образом, при работе молотка боек совершает удары по инструменту, корпус и инструмент могут находиться как в контакте, так и соударяться с бойком и между собой. Кроме того, в молотке при определенных условиях имеют место и другие удары, в частности «жесткие» удары бойка по задней стенке корпуса молотка, удары по корпусу, вызванные колебаниями в инструменте, и т. д. Однако эти удары в настоящее время нами не рассматриваются ввиду несущественного влияния их на работу молотка.

При электронном моделировании вибрации пневматических молотков необходимо реализовать отмеченные удары и контакты. Проанализируем кратко известные нам работы по этому направлению.

Все работы исходят из того, что возможна различная интерпретация процесса удара:

а) соударяющиеся тела могут рассматриваться как совершенно жесткие, а сам процесс удара мгновенным (классическая теория соударения твердых тел);

б) при анализе процесса может быть учтено время взаимодействия соударяющихся тел.

Различная интерпретация процесса удара в основном определяется данными непосредственного эксперимента, который в общем случае должен предшествовать постановке задач теоретического исследования.

Классическая теория соударения твердых тел рассматривает соударяющиеся тела как абсолютно жесткие, имея в виду, что удар происходит практически мгновенно и характеризуется коэффициентом восстановления скорости.

Однако данные эксперимента [1] показывают, что в ряде случаев время удара соизмеримо с временем движения системы в период между ударами. Это подчеркивает необходимость получения данных, характеризующих процессы, которые происходят в системе непосредственно в период соударения. По нашему мнению, это справедливо для случаев, когда период между ударами настолько мал, что он оказывается соизмеримым с временем удара. В зависимости от интерпретации относительно ударов в литературе описаны электронные модели двух типов. В моделях одного типа моделируется мгновенное изменение скорости [2, 4, 7, 8, 9, 10], в других — сам процесс удара [1, 5].

В работе [2] предложено моделирование отскока бойка после удара его по торцу пики в соленоидном молотке. Осуществляется оно следующим образом. В обратную связь интегрирующего усилителя, на выходе которого имеем напряжение, соответствующее скорости движения бойка, включены параллельно два конденсатора  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 1, а). При достижении координатой перемещения бойка крайних значений реле меняет местами контакты конденсатора  $C_2$ , тем самым изменяя напряжение на выходе усилителя, моделирующее скорость перемещения бойка.

Как показывает расчет, отношение скоростей до и после переключения коэффициента отскока равно

$$R = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}.$$

Одновременно с переключением контактов конденсатора происходит изменение напряжений, соответствующих достигнутому крайним значениям координаты перемещения.

Как только координата достигнет второго предельного значения, переключение повторяется и т. д.

Предложенная методика воспроизведения остановок бойка в соленоидном молотке, по нашему мнению, имеет некоторые недостатки. Прежде всего, она обеспечивает ограниченный ряд значений коэффициента отскока. Для каждого нового значения требуется новая емкость.

Кроме того, данная методика требует, чтобы удары повторялись при достижении координатой перемещения бойка крайних своих значений. В противном случае все последующие отскоки будут воспроизводиться неверно. Из этого следует, что предложенная методика имеет сравнительно узкую область применения.

В работе [3] описана модель упругого удара с коэффициентом восстановления скорости, равным единице. В данном случае упругий ограничитель, о который ударяется масса, представляется в виде пружины с коэффициентом жесткости, соответствующим модулю упругости обрабатываемого материала.

Однако коэффициент восстановления скорости  $R$  в реальных машинах может изменяться в пределах от нуля до единицы.

В работе [7] предложена модель виброударника для случая, когда коэффициент восстановления скорости равен нулю (случай неупругого

удара). Идея моделирования основана на том, что при выполнении условия удара срабатывает нормально разомкнутое реле и мгновенно разряжает емкость в цепи отрицательной обратной связи интегратора. Выходное напряжение интегратора соответствует скорости ударника.

В работе [8] описывается следующая методика реализации удара в вибромолоте. Машина работает в режиме «остановка», то есть интегрирование происходит до тех пор, пока разность координат ударной части вибромолота и сваи положительна. При уравнивании координат реле остановки срабатывает, и интегрирование прекращается. Величина перемещений и скоростей в момент остановки являются искомыми для момента перед ударом. Затем путем несложных расчетов находятся скорости ударной части и сваи после удара, которые устанавливаются на модели в качестве начальных условий для изучения следующего цикла движения.

Скорости пересчитываются, исходя из коэффициента восстановления скорости при соударении двух тел.

В работе [9] предложены два способа моделирования удара с коэффициентом восстановления скорости  $R$ , отличающимся от единицы. Основным в них является использование следящей системы типа «инерционное звено» для непрерывного дублирования на дополнительном интеграторе скорости виброударника по ее значению на основном интеграторе. С каждым ударом взаимноменяются роли основного и дополнительного интеграторов. Это делается с помощью блоков сигнатур. После каждого удара на очередном основном интеграторе в качестве начального условия реализуется послеударная скорость.

Однако эти модели для  $R < 1$  являются весьма сложными.

Нами разработана простая модель упругого удара, составленная в предположении, что имеет место мгновенное изменение скорости при ударе [4]. Предполагается, что происходит удар какой-то подвижной массы о неподвижное тело. При этом связь между скоростями до и после удара можно представить следующим образом:

$$\dot{x} = -R\dot{x}_0,$$

где  $\dot{x}_0$  — скорость до удара;

$\dot{x}$  — скорость после удара;

$R$  — коэффициент восстановления скорости.

Модель позволяет задавать любые значения  $R$  в пределах от нуля до единицы.

Блок-схема модели (рис. 1, б) включает в себя: операционный усилитель 1, работающий в режиме интегрирования; блок постоянных коэффициентов  $R$ ; операционный усилитель 2, работающий в режиме инвертирования, на выход которого подключается емкость  $C_2$ , равная емкости  $C_1$  в цепи обратной связи интегратора, и переключающее устройство. Усилитель 1 интегрирует вторую производную по времени от перемещения тела, совершающего удар. На выходе интегратора получается первая производная, то есть скорость. Через блок постоянных коэффициентов, на котором набирается коэффициент восстановления скорости, напряжение подается на вход инвертирующего усилителя 2. На его выходе, следовательно, непрерывно дублируется скорость по ее значению на выходе интегратора.

В момент удара реле переключающего устройства взаимно заменяет емкость  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 1, б). После каждого удара на выходе интегратора 1 в качестве начального условия реализуется послеударная скорость —  $R\dot{x}_0$ .

Чтобы ослабить влияние неодновременного срабатывания контактов реле на задание коэффициента  $R$ , емкость к выходу усилителя 2 подключается последовательно с сопротивлением  $r$ .

Момент удара определяет переключающее устройство [10]. Для определения момента удара вводится условие, что координата перемещающегося тела достигает значения, соответствующего положению неподвижного тела.

Сравнение описанной схемы моделирования удара с подобными [8] показывает, что при ее использовании достигается экономия в операционных усилителях (требуется в два раза меньше усилителей) и в количестве элементов, которое входит в обычно используемые блоки сигнатур.

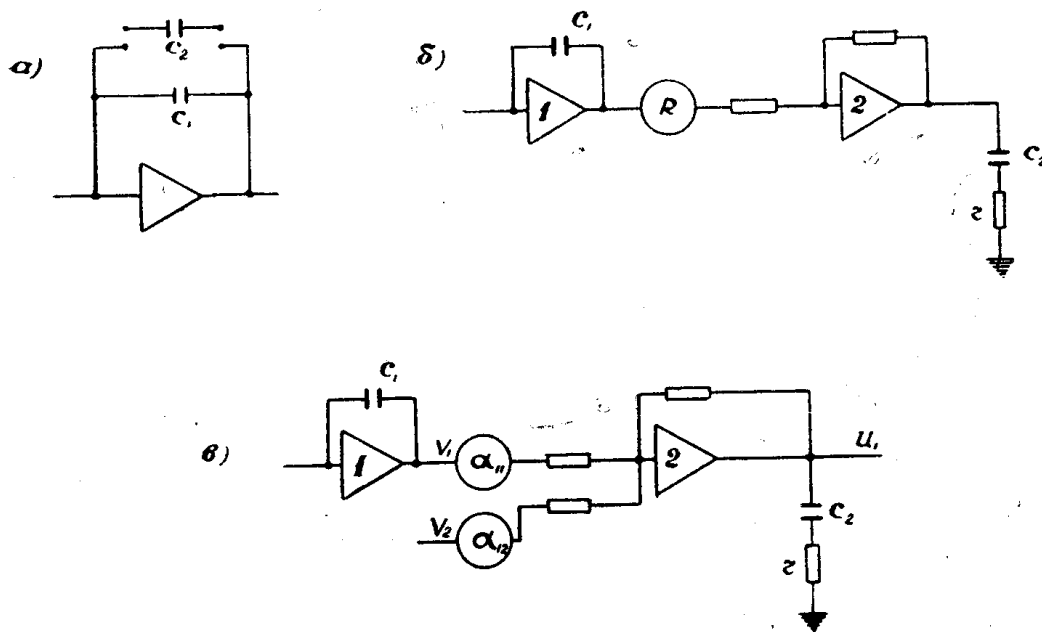


Рис. 1. Структурные схемы моделей удара: а) с набором емкостей в обратной связи интегратора 2; б) с дополнительным блоком постоянных коэффициентов; в) то же для двух свободных масс

Предложенная модель имеет некоторые недостатки. Прежде всего, она является не универсальной. Далее она предполагает незначительные изменения в схеме операционного усилителя, позволяющие, во-первых, производить переключения емкости и, во-вторых, повысить точность воспроизведения коэффициента восстановления скорости.

Дело в том, что при переключении емкости в стандартном усилителе постоянного тока типа УПТ-4 наблюдается уменьшение значения  $R$  по сравнению с заданным на 5—10%. Это изменение объясняется наличием местной обратной отрицательной связи в выходном каскаде УПТ-4, которая передает изменения напряжения на аноде лампы выходного каскада (при переключении емкости) на сетку выходной лампы. Это приводит к значительному перезаряду емкости, вновь подключенной в цепь обратной связи интегратора. Нами местная обратная отрицательная связь с выходного каскада была переставлена в промежуточный каскад УПТ-4.

Исследования модели удара при изменении в схеме УПТ подтвердили достаточную относительную точность (1—2%) получения коэффициента  $R$ .

Ввиду указанных выше особенностей, целесообразно применять описанную модель при использовании моделирующих машин, не имеющих стандартных блоков сигнатур (например ИПТ-5, МПТ-9 и т. д.).

Предложенная нами модель удара использовалась при исследовании пневматических молотков на электронной моделирующей установке типа ИПТ-5. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при исследовании реальных молотков.

Интересная методика моделирования отскока ударника от неподвижного инструмента описана в работе [9]. Она имеет нечто общее с методиками, предложенными Бебиховым [8]. Схема для моделирования отскока изображена на рис. 2. Работает она следующим образом.

При запуске электронной модели интегрирование второй производной от перемещения бойка  $\ddot{x}$  производится операционным усилителем 1. При этом усилители 2 и 3 попеременно работают в режиме масштаб-

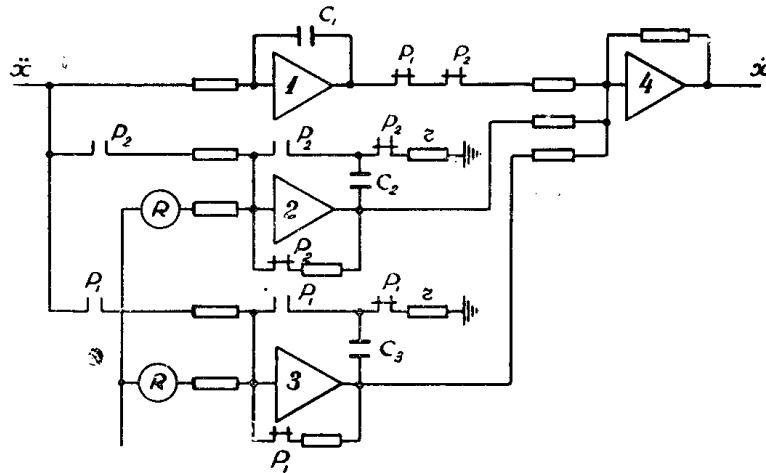


Рис. 2. Модель удара с двумя блоками, попеременно работающими в режиме масштабного усиления

ного усиления, заряжая конденсатор  $C_2$  или  $C_3$  до напряжения, соответствующего скорости ударника  $\dot{x}$ . Попеременная работа усилителей 1 и 2 вызвана скачкообразным изменением скорости в момент удара. В этот момент (он определяется с помощью схемы сравнения и шагового искаителя) включается реле  $P_2$ , которое производит переключения в обратной связи усилителя 2.

Усилитель 1 отключается, а усилитель 2 начинает работать в режиме интегрирования в течение всего последующего цикла, имея начальным условием величину скорости  $\dot{x}$ . В момент следующего удара включается реле  $P_1$ , а реле  $P_2$  — отключается. Благодаря этому, усилитель 2 возвращается в режим масштабного усилителя, а усилитель 3 включается в режим интегратора с начальным условием, пропорциональным конечной скорости на предыдущем периоде. Коэффициент пропорциональности (коэффициент восстановления скорости  $R$ ) задается с помощью блока постоянных коэффициентов.

Сравнение этой схемы с предложенной нами показывает, что она требует в 2,5 раза больше усилителей, реле и, видимо, уступает в быстродействии, поскольку ее работой предполагается последовательное переключение реле.

Предложенную нами модель удара (рис. 1, б) можно сделать более универсальной, поставив задачу исследования процесса центрального удара двух тел разной массы, движущихся до удара с различными скоростями.

В этом случае послеударные скорости  $U_1$  и  $U_2$  масс  $m_1$  и  $m_2$  на основании скоростей масс перед ударом  $v_1$  и  $v_2$  определяются по формулам:

$$U_1 = \alpha_{11} V_1 + \alpha_{12} V_2,$$

$$U_2 = \alpha_{21} V_2 + \alpha_{22} V_1,$$

где  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{21}$ ,  $\alpha_{22}$  — постоянные коэффициенты.

Для реальных условий эти коэффициенты определяются опытным путем. В соответствии с этими выражениями блок для задания послеударной скорости для массы  $m_1$  может быть представлен так, как показано на рис. 1, в.

В общей схеме модели для двух масс должны быть предусмотрены по две схемы моделирования послеударных скоростей указанного вида (рис. 1, в) с одной общей управляющей схемой (рис. 1, б), на вход которой в этом случае должна быть подана разность напряжений, моделирующих координаты подвижных соударяющихся масс.

Выше были рассмотрены модели, исходящие из классической постановки задачи об ударе. Однако в ряде случаев время удара соизмеримо с временем движения системы в период между ударами [1, 5].

Для этих случаев необходимо получить данные о процессах, которые происходят в системе непосредственно в период соударения.

Если при анализе системы воспользоваться классической теорией соударения твердых тел, то следует полагать, что во время удара в точке соприкосновения соударяющихся тел должны возникать бесконечно большие по величине, но мгновенно действующие силы, приводящие к конечному изменению количества движения.

Однако на систему материальных точек наряду с мгновенными силами, возникающими только в период соударения, действуют конечные по величине силы (например, сила тяжести, силы сухого и вязкого трения и др.). Импульсы этих сил за бесконечно малое время удара будут малы и при наличии конечных по величине импульсов мгновенных сил могут быть опущены.

В связи с изложенным, представляется целесообразным в общем случае весь процесс разделить на период между ударами и период удара. Для каждого из этих периодов принимается свое математическое описание. Процесс между ударами рассматривается в одном масштабе времени, а сам удар — в другом.

Для перехода от системы дифференциальных уравнений, отображающих движение в период между ударами, к системе уравнений, периода удара, вводится соответствующее условие сопряжения.

Именно так в работе [5] рассматривается моделирование процесса вибрационного погружения. Эта механическая система в определенном смысле аналогична пневмомолотку.

Рассматриваемая методика [5] учитывает время соударения независимо от того, мало оно или соизмеримо с временем цикла. Видимо, такой метод целесообразно применять в случаях, когда общее время соударения фиксировано или изменяется в некоторых незначительных пределах. Именно исходя из этого и выбирается масштаб времени, который может быть принят единым для ударного и безударного периодов.

В работе [1] дается сравнение различных методов решения задачи об ударе в вибромолоте.

Результаты сравнения показывают совпадение (в пределах погрешности машинного решения уравнений) параметров, характеризующих поведение ударной части системы.

На основе проведенного анализа известных нам приемов моделирования ударов целесообразно следующим образом моделировать удары и контакты при работе пневматического молотка.

Послеударные скорости бойка и инструмента при их соударении задаются с помощью блока, описанного авторами в работе [10].

Исходные для моделирования коэффициенты отскока бойка и инструмента должны быть определены экспериментальным путем, так как теория ударов не располагает информацией на этот счет.

Удар ударника по передней стенке корпуса, что имеет место при аварийных режимах работы молотка, можно моделировать с помощью пружины с коэффициентом жесткости, соответствующим модулю упругости стали. Коэффициент восстановления скорости при этом будет равен единице (потерь при ударе нет).

Упругие свойства обрабатываемого материала моделируются также пружинной с жесткостью, соответствующей модулю упругости материала. Из экспериментальных исследований известно, что этот коэффициент отскока инструмента от обрабатываемого материала меньше единицы и определяется конкретными условиями и параметрами инструмента. Моделирование может упроститься, если коэффициент отскока инструмента при его ударе по обрабатываемому материалу отнести к отскоку инструмента при ударе по нему ударника. В этом случае начальная скорость движения инструмента после удара по нему бойком задается с учетом коэффициента отскока инструмента от обрабатываемого материала.

Контакт между корпусом и инструментом нами моделируется с помощью пружины, имеющей жесткость, соответствующую модулю упругости стали. Послеударная скорость для корпуса при соударении его с инструментом задается также с помощью блока удара [10]. Коэффициенты, влияющие на отскок корпуса, определяются опытным путем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Ашавский, Ю. П. Волков. К анализу работы виброударника. Труды ЦКБ МГ и ОН СССР, № 5, 1962.
2. Л. М. Минкевич. Использование моделирующих устройств для исследования соленоидных молотков. Математические методы в горном деле, часть первая, Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1963.
3. В. Ф. Горбунов, А. В. Триханов. Исследование колебаний отбойного молотка с упругой рукояткой на электронной модели. Межвузовский сборник трудов, вып. 1, Новосибирск, 1963.
4. В. Ф. Горбунов, В. М. Разин, А. В. Триханов. Некоторые результаты моделирования колебаний пневматических молотков с виброизоляционными устройствами. Математические методы в горном деле, часть 1, Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1963.
5. И. М. Тетельбаум, А. М. Ашавский, Н. И. Челноков. Электронные модели удара в применении к системам вибропогружения. Межвузовская научная конференция по применению физического и математического моделирования. МЭИ, 1959.
6. Л. В. Бессонова. К теории виброударного механизма. Известия СО АН СССР, отд. техн. наук, № 5, 1957.
7. И. С. Лукомский. Вопросы обоснования расчетной схемы вибромолотка. Исследование свабойного оборудования. Труды института ВНИИстройдормаша, Москва, 1963.
8. В. А. Бебихов. Моделирование на МН-8 виброударника. Известия вузов, Радиофизика, т. 3, № 2, 1960.
9. Г. А. Терехов, А. Д. Школьников. Электронное моделирование рабочего цикла пневматических отбойных молотков. Известия вузов, Горный журнал, 1963.
10. В. Ф. Горбунов, В. М. Разин, А. В. Триханов. Электронная модель упругого удара, Изд. ГОСИНТИ, 1964.