

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ

Объектом данного исследования являются одномассовые виброударные демпферы. Основным методом исследования было выбрано гибридное моделирование. В статье представлены временные процессы, спектральные характеристики и фазовые траектории для динамических гасителей с кусочно-линейной упругой характеристикой, имеющие ограничители: с первоначальным зазором, с различными участками жесткости упругой связи, с предварительным натягом.

The object of the present study is one-mass vibro-percussion dampers. Hybrid modelling was chosen as the main testing method. The time processes, spectral characteristics and phase trajectories for dynamic dampers with the piecewise-and-linear elastic characteristic, having limiters with an initial backlash, with different segments of elastic ties rigidity or with initial tightness have been described.

### Введение

Применение высокопрочных материалов и совершенствование конструктивных форм позволяют снизить собственный вес конструкций, а также и их стоимость. Однако подобные конструктивные решения приводят к уменьшению жесткости элементов конструкций и повышению их чувствительности к динамическим воздействиям, что выражается в заметном увеличении амплитуд колебаний. Основными видами динамических воздействий являются подвижные, ветровые и сейсмические нагрузки. Колебания элементов конструкций, с одной стороны, может отразиться на их несущей способности, а с другой – вызвать ощущения дискомфорта у людей, не угрожая сооружению или отдельным его элементам. Следует отметить, что повышение прочности сталей не сопровождается повышением их выносливости. В связи с этим резко возрастает значение динамических расчетов, исследований динамического поведения элементов конструкций, методов гашения колебаний.

Элементы металлических конструкций, как и прочие реальные механические колебательные системы, обладают свойством диссипации энергии: вследствие необратимых процессов, происходящих в материале элемента (рассеяние энергии в материале), в узлах соединений (конструктивное демпфирование); потерь энергии в окружающую среду; действия гасителей колебаний. Соотношение данных составляющих потерь энергии зависят от материала, конструктивной формы элемента, а также условий работы [1; 2].

Влияние диссипативных сил особенно существенно при резонансных режимах колебаний. Для незначительных амплитуд колебаний рассеяние энергии обеспечивается силами внутреннего трения, а при резонансных значениях амплитуд – силами конструкционного трения.

### Постановка задачи

Динамические гасители колебаний, предназначенные для снижения вибраций строительных конструкций, могут быть разделены на две большие группы – линейные и нелинейные. Гасители колебаний, у которых при деформации упругой связи возникают усилия, пропорциональные деформации, называются линейными. К ним обычно относят гасители с вязким трением и внутренним неупругим сопротивлением. Гасители с использованием сухого трения и конструкционного сопротивления, связанного с потерями энергии в соединениях элементов на опорах и в узлах, а также гасители с нелинейными связями относят к нелинейным (рис. 1).

Объектом данного исследования являются одномассовые виброударные демпферы, свободные колебания которых описываются дифференциальным уравнением вида

$$m \ddot{y} + H(\dot{y}) + R(y) = 0, \quad (1)$$

где  $m$  – масса;  $y$ ,  $\dot{y}$ ,  $\ddot{y}$  – обобщенные перемещение, скорость и ускорение массы;  $H(\dot{y})$  – диссипативная сила;  $R(y)$  – восстанавливающая сила.

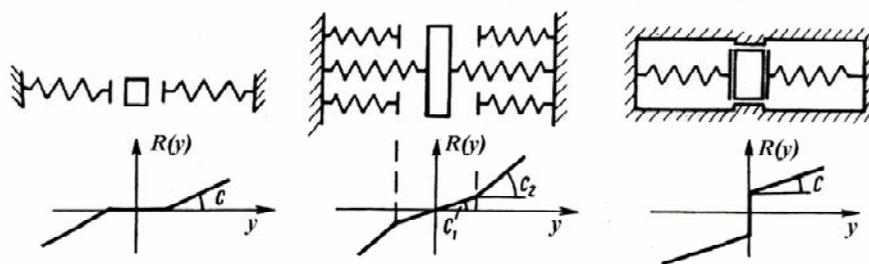


Рис. 1. Расчетные схемы и упругие характеристики нелинейных динамических гасителей колебаний

Динамические гасители с кусочно-линейной характеристикой восстанавливающей силы, имеющие ограничители: с первоначальным зазором, с различными участками жесткости упругой связи, с предварительным натягом – относятся к группе нелинейных гасителей. Заметим, что нелинейная механическая система «конструкция – гаситель» характеризуется неоднозначностью поведения, которая может отрицательно отразиться на эффективности гашения колебаний. Применение нелинейных гасителей колебаний связано с необходимостью тщательных расчетных и экспериментальных исследований [2].

#### Применение фазовых траекторий к идентификации упругих и диссипативных характеристик

При теоретическом исследовании колебаний возникает необходимость построения математической модели. Для этого используют данные технических чертежей, описаний, а также другой документации о структуре и значениях отдельных параметров. Однако в некоторых случаях эта информация может быть недостаточной. Эффективным при этом оказывается использование методов идентификации систем [3]. Они заключаются в построении математической модели объекта по экспериментальным записям. Большинство измерительных устройств регистрирует изменения перемещений, скоростей и ускорений точек исследуемых колебательных систем во времени. Большинство методов идентификации динамических характеристик механических систем основано на раздельном анализе записей изменений перемещений и скоростей точек во времени. Автором предложено использование фазовых траекторий на плоскости «ускорение – перемещение» и «ускорение – скорость» для исследования динамических свойств нелинейных гасителей колебаний. Данные фазовые траектории можно получить, принимая последовательно соответствующие

пары значений параметров ускорения и перемещения и ускорения – скорости (рис. 2). Наибольший интерес представляет фазовая плоскость «ускорение-перемещение». Это связано с тем, что энергетические критерии на ней интерпретируются наиболее наглядно. В частности, площадь, ограниченная кривой «ускорение – перемещение» равна работе, а обход ее контура против часовой стрелки соответствует энергии, затраченной системой [4]. Кроме того, данная зависимость зеркально симметрична относительно оси перемещение графику изменения упругой характеристики (рис. 3)

$$\bar{R}(y) = R(y) / m.$$

Именно фазовые траектории позволяют установить вид и уровень нелинейности системы и могут быть эффективны в процедурах как структурной, так и параметрической идентификации.

#### Гибридное моделирование

Основным методом исследования было выбрано гибридное моделирование. При моделировании на гибридных вычислительных комплексах (ГВК) реальная система заменяется физической (электрической) моделью, а вычислительная машина становится рабочей моделью. ГВК имеют в своем составе аналоговые и цифровые ЭВМ. ГВК обладают быстродействием аналоговых вычислительных машин, точностью и большим объемом памяти цифровой ЭВМ. В отличие от ЦЭВМ, ГВК дает возможность пользователю визуально наблюдать за вычислительным процессом при помощи осциллографов, самописцев и т. п., а также в ходе вычислительного процесса позволяет изменять параметры исследуемой модели. Таким образом, ГВК предоставляет большие возможности [1] для изучения влияния изменения параметров на поведение исследуемых систем, а также позволяет отслеживать режимы, не реализуемые на ЦЭВМ.

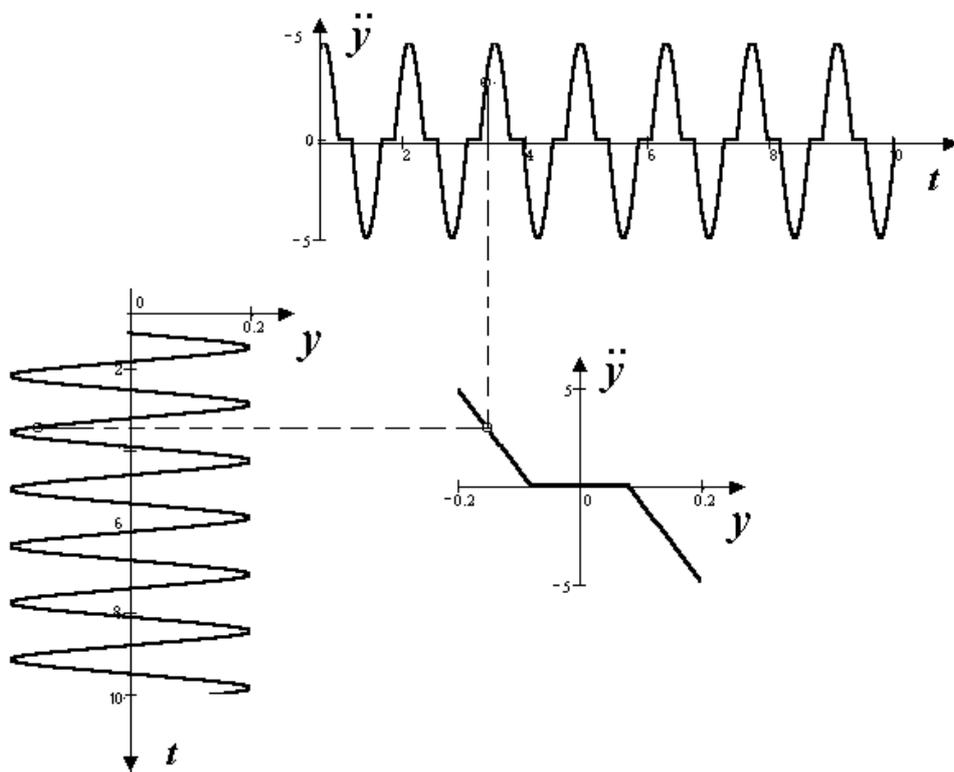


Рис. 2. Построение фазовых траекторий  $\dot{y}(y)$

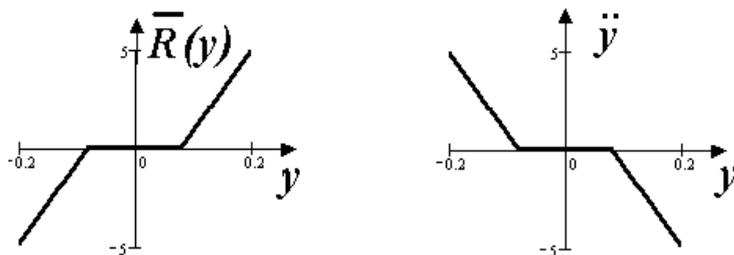


Рис. 3. Графики упругой характеристики и «ускорение – перемещение» системы с «люфтом»

#### Анализ полученных результатов

В статье представлены временные процессы, спектральные характеристики и фазовые траектории для динамических гасителей с кусочно-линейной упругой характеристикой, имеющие ограничители: с первоначальным зазором, с различными участками жесткости упругой связи, с предварительным натягом (рис. 4).

Анализируя полученные записи временных процессов для системы с «люфтом» и системы с «натягом», можно отметить, что они подобны и имеют вид моногармонического процесса. Таким образом, записи процессов  $y(t)$  недостаточны для идентификации механических систем. Временные процессы  $\dot{y}(t)$  этих систем

имеют незначительные отличия, а процессы  $\ddot{y}(t)$  – существенные. Так, для систем с «люфтом» на временных процессах появляются точки мгновенного покоя.

Фазовые плоскости  $(y, \dot{y})$  представленных систем состоят из нескольких областей, в которых поведение динамической системы линейно (рис. 5).

Количество таких областей зависит от вида нелинейности системы. Так, для системы с «люфтом» областей линейного поведения систем три, а для системы с «натягом» две. Основная задача структурной идентификации систем с кусочно-линейной упругой характеристикой состоит в определении количества областей линейного поведения системы и их границ.

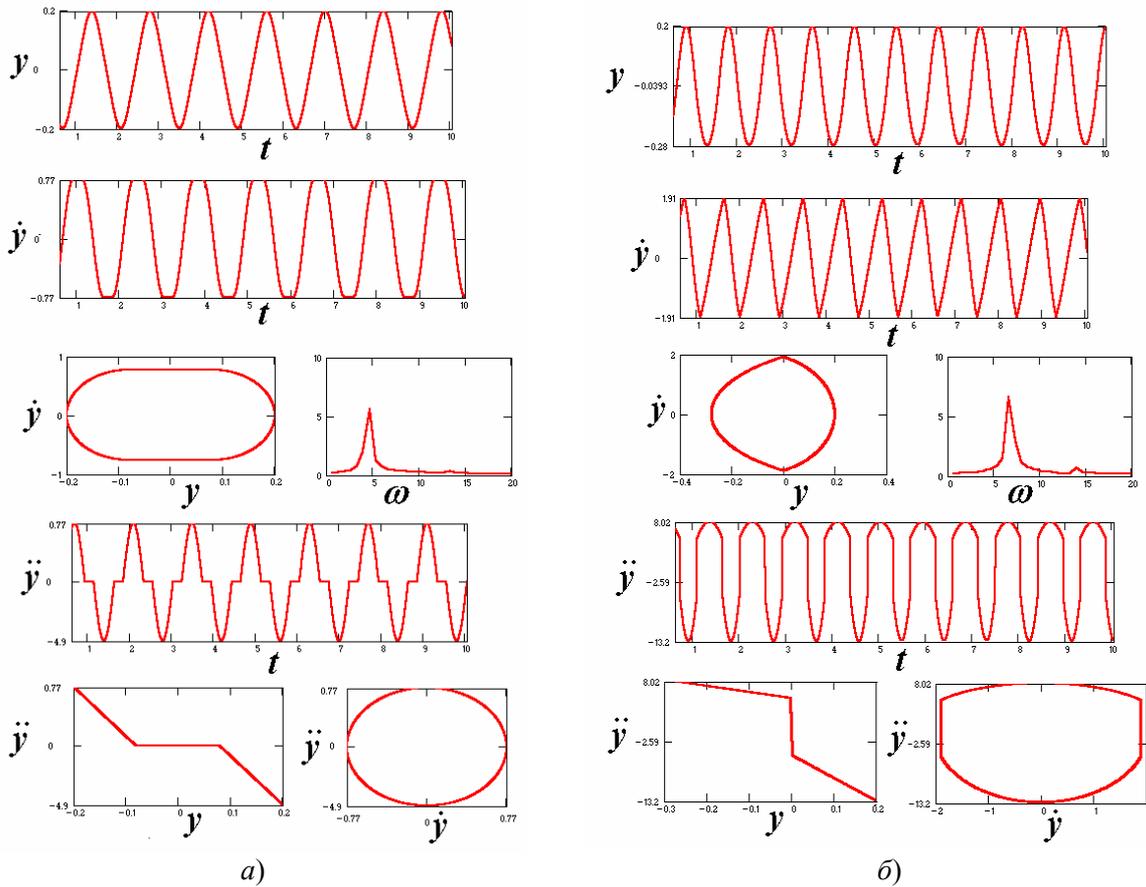


Рис. 4. Временные процессы, спектральные характеристики и фазовые траектории: а) системы с «люфтом»; б) системы с «натягом»

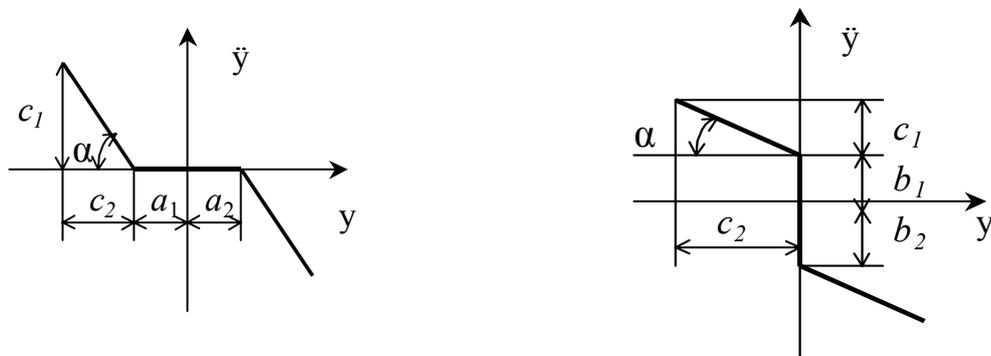


Рис. 5. Определение параметров упругих характеристик по фазовым траекториям в плоскости «ускорение-перемещение»

Фазовые траектории на плоскости  $(y, \ddot{y})$  могут быть также применены в процедуре параметрической идентификации. Так, измерив длины отрезков  $a_1$  и  $a_2$  (рис. 5) или отрезков  $b_1$  и  $b_2$ , можно определить величины люфта и натяжения упругой характеристики механической системы, а определив угол наклона траектории в плоскости «ускорение-перемещение» к оси «перемещение»  $\alpha$  по значению двух катетов

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c_1}{c_2},$$

можно установить значение жесткости механической системы. Так определяют характеристики упругой силы механической системы, которые были неизвестны либо нуждались в уточнении. В отличие от существующих асимптотических и стохастических методов идентификации динамических систем, использование предложенной методики не сопряжено с использованием значительного количества вычислительных процедур, а также имеет ряд преимуществ при исследовании разрывных колебаний.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах / Под. ред. В. Н. Челомей. – М.: Машиностроение. Т. 2, 1979. – 351 с.
2. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций: Справочник проектировщика / Под ред. Б. Г. Коренева, А. Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1986. – 461 с.
3. Редько С. Ф. Идентификация механических систем. Определение динамических характеристик и параметров / С. Ф. Редько, В. Ф. Ушкалов, В. П. Яковлев. – К.: Наук. думка, 1985. – 216 с.
4. Казакевич М. И. Фазовые траектории нелинейных динамических систем: Атлас / М. И. Казакевич, В. Е. Волкова. – Д.: Наука и образование, 2002. – 94 с.

Поступила в редколлегию 07.02.04.