

УДК 62-752.2.001.2

В.Ф. ШАТОХИН, С.Д. ЦИММЕРМАН

ОАО «Калужский турбинный завод», Россия

**ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И УСКОРЕНИЯ,
ИСПЫТЫВАЕМЫЕ АМОРТИЗИРОВАННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ,
В СЛУЧАЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ УДЕРЖИВАЮЩИХ СВЯЗЕЙ**

Приводятся результаты исследований обобщенной динамической модели амортизированного оборудования при нестационарном кинематическом воздействии. Показано влияние изменения основных параметров наиболее распространенных типов связей (амортизатор, демпфер, ограничитель перемещений) в амортизирующем креплении на динамические характеристики (перемещения и ускорения) амортизированного оборудования.

амортизирующее крепление оборудования, динамическая модель, амортизатор, демпфер, ограничитель перемещений, кинематическое воздействие, динамические характеристики (перемещение, ускорение)

Амортизирующее крепление (АК) оборудования различного назначения выполняет две главные функции:

— уменьшение передачи энергии колебаний на фундамент (корпус) по сравнению с жестким креплением оборудования, что определяет виброакустическую эффективность АК. Поэтому, прежде всего, оборудование должно быть установлено на несущие амортизаторы (низкочастотные – для выполнения первой функции АК; или выбор их параметров может определяться другими требованиями);

— уменьшение деформаций элементов оборудования (трубопроводов, сильфонов, самих амортизаторов) при различных (в том числе импульсных кинематических) воздействиях. В последнем случае существенным является снижение ускорений (перегрузок) на оборудовании, что достигается применением специальных устройств (в частности, устройств с большими потерями энергии при их ударном деформировании).

Конструктор на этапе проектирования должен знать динамические характеристики – максимальные перемещения различных точек изделия (или деформации связей) и максимальные ускорения (перегрузки), которые будет иметь оборудование при нестационарных колебаниях в случае ударного воздействия.

Результаты таких расчетов далее используются для проверки ударостойкости ответственных деталей и прочности связей. Динамические характеристики, в конце концов, определяют массо-габаритные характеристики оборудования и тип крепления.

Задача исследования: определить влияние основных параметров различных элементов АК (амортизатор, ограничитель, демпфер) на динамические характеристики амортизированной системы при ударных (импульсных) воздействиях. Важным считается возможность получить снижение как перемещений, так и ускорений оборудования при нестационарных колебаниях.

Воздействие считается внешним, детерминированным и приходит к корпусу (фундаменту). Характеристика кинематического ударного воздействия принята стандартной (зависимость ускорение-время) и не менялась в процессе исследований.

В [1, 2] влияние параметров некоторых элементов АК рассмотрено для сложной динамической модели с большим числом амортизаторов, ОП различного типа, демпферных устройств. В сложной модели, как правило, рассматривается пространственное движение системы амортизированных меха-

низмов (масс). Такие исследования полезны для конкретных моделей исполнения АК, но изучить влияние основных параметров различных связей на динамические характеристики амортизированных масс достаточно сложно. Необходимы более простые динамические модели с ограничением движения по одной координате и ограниченным количеством связей. Поэтому амортизированная система масс, рассмотренная в [1, 2], сведена к некоторой обобщенной модели, исследованию нестационарных колебаний которой и посвящена эта работа¹. При этом характеристика каждой связи (амортизатор, демпфер, ОП) представляет собой интегральную характеристику подобных связей всего АК в поперечном направлении.

В работе использован уникальный программный комплекс «Амортизация-2003» [3, 4] для исследования нестационарных колебаний динамических систем при кинематическом ударном воздействии, позволяющий учитывать не только линейные и нелинейные ударные характеристики амортизаторов, но и ударные характеристики типа гистерезисной петли, полученные на испытательном стенде.

Выбор динамической модели. Обобщенная расчетная модель (рис. 1) выбрана таким образом, чтобы обеспечить движение только по одной координате (исключив поворотные составляющие). На амортизированном оборудовании (первый каскад амортизации) обычно устанавливаются механизмы на своих амортизаторах (второй каскад АК), часто с относительно малой массой (насосы и т.п.). Поэтому в общем случае динамическая модель является двухмассовой (двухкаскадной). Под каждой массой обобщенной расчетной модели располагается по одному элементу из наиболее распространенных в настоящее время связей АК:

- амортизатор (1, 4) – в виде упругой (линейной) связи;
- ограничитель перемещений (2, 5) – связь с

нелинейной характеристикой (ОП – может быть выполнен из различных материалов);

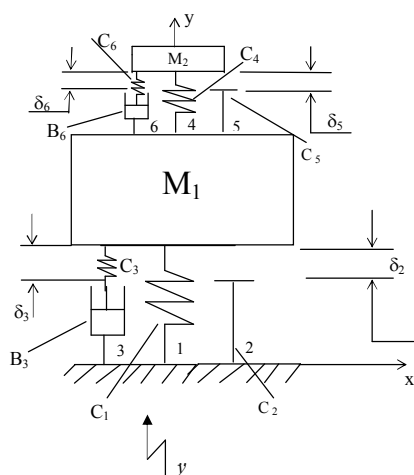
- демпфер (3, 6) – связь с нелинейной характеристикой и большими потерями энергии при ее деформировании.

Роль демпфера в АК при нестационарных колебаниях могут играть либо резиновые массивы, либо специальные гидропневматические демпферные устройства. Основная характеристика демпфера – потери энергии при его ударном деформировании. Это выражается в большой площади гистерезисной петли, если ее построить в координатах сила-деформация. Гидропневматические устройства позволяют менять ударную характеристику за счет изменения протечек (настраивать демпфер), в то время как резиновый массив имеет жестко заданную ударную характеристику, зависящую от размера массива и типа примененной резины. Кроме этого гидропневматическое демпферное устройство может играть положительную роль при циклических воздействиях (например, при качке на волнении) или вибрационных воздействиях; а возможность изменения жесткости упругого элемента, включенного в конструкцию демпфера, позволит проходить резонансные режимы установки в случае перехода к конструкциям несущих амортизаторов, обеспечивающим сверхнизкие частоты оборудования на амортизаторах.

Основным параметром связей АК при ударных воздействиях считается:

- для упругой связи – жесткость;
- для ограничителя перемещений (ОП) – жесткость и величина зазора в ОП;
- для демпферных устройств – характеристика поглощения энергии при нестационарных колебаниях в виде гистерезисной петли (коэффициент потерь ψ) наряду с законом изменения силы сопротивления на ходе «сжатие» демпфера (нагрузочная часть характеристики демпфера). Коэффициент потерь ψ демпфера определяется аналогично [1].

¹ Вариантные расчеты выполнены инженером Степных Н.В.



- 1 – упругий элемент (амортизатор) с жесткостью C_1 ;
 2 – ограничитель перемещений (ОП), установленный с зазором δ_2 ;
 C_2 – жесткость ОП;
 3 – демпферное устройство; в пределах зазора δ_3 работает упругий элемент C_3 , восстанавливающий элементы демпфера в номинальное положение после различных воздействий;
 B_3 – характеристика демпфера, включающая в себя как силы сопротивления, так и потери. Для других типов демпферных устройств, например, резиновых массивов, когда используется резина с большими потерями энергии при ударном деформировании,
 δ_3 – зазор;
 4, 5, 6 – элементы амортизации массы 2 (второй каскад амортизации), идентичные (по назначению) элементам амортизации массы 1;
 \ddot{y} – ускорение кинематического воздействия

Рис. 1. Обобщенная расчетная модель двухкаскадной амортизированной системы

На рис. 2 приведены ударные характеристики типовых связей АК. Для исследования влияния основных параметров связей на динамические характеристики амортизированных масс рассматриваются две динамические модели, получаемые из обобщенной модели (рис. 1): обобщенная модель первого каскада АК (рис. 3.0) и обобщенная модель второго каскада АК (рис. 4.0).

	Тип связи		
	1, 4	2, 5	3, 6
	Упругий элемент (амортизатор)	Ограничитель перемещений	Демпфер
Ударная характеристика связи			

Рис. 2. Динамические (ударные) характеристики амортизатора, ОП и демпфера: δ – зазор (в одну сторону по отношению к среднему положению)

Первый каскад амортизации. Обобщенная модель для исследования первого каскада амортизации приведена на рис 3.0; номера связей соответствуют рис. 1. Соотношение масс в динамической модели $M_1/M_2 = 400$. Влияние массы M_2 на динамические характеристики массы M_1 незначительное. Масса M_2 на своих амортизаторах имеет парциальную частоту $f_2 = 13$ Гц, определенную по ударной жесткости связи 4. Такой уровень частот характерен для малых амортизированных масс (насосов и т. п.), расположенных на массивных блоках.

На рис. 3.1 – 3.4 по оси абсцисс – изменение в сторону увеличения основного параметра связи (жесткости – для упругого элемента; коэффициента потерь – для демпфера; жесткости – для ОП). На рис. 3.5 по оси абсцисс – изменение величины зазора δ_2 в ОП. По оси ординат: слева – перемещения центров масс, справа – ускорения. Результаты расчетов (1' – динамические характеристики для массы M_1) показывают, что только демпфер (увеличение потерь в нем) при определенной его настройке обеспечивает уменьшение и перемещений, и ускорений. Остальные связи с увеличением их основных параметров уменьшают перемещения (деформации связей), но вызывают рост ускорений (перегрузок) на амортизированном оборудовании. Не всегда эта закономерность проявляется для ОП при увеличении зазора δ_2 в нем (рис. 3.5). Традиционно считается, что амортизированная масса 1 после нестационарного воздействия разгоняется в зазоре δ_2 и при посадке на ОП испытывает повышенные перегрузки. Но в конструкции АК с ОП есть еще связь 1, удерживающая оборудование в номинальном положении (несущая массу оборудования). В зависимости от ее жесткости ускорения могут даже уменьшаться (рис. 3.5, а, парциальная частота $f_1 = 15$ Гц). Для низкочастотной системы ($f_1 = 2,4$ Гц) с ОП динамические характеристики (рис. 3.5, б) возрастают с увеличением зазора. Динамические характеристики амортизированной массы M_2 в зависимости от

изменения параметров связей первого каскада амортизации существенно зависят от развития колебаний типа биений при сближении частотных характеристик масс M_1 , M_2 . Поэтому динамические характеристики массы M_2 , для удобства представления на рис. 3.1 – 3.4 результатов расчета, уменьшены в 10 раз.

Второй каскад амортизации. Обобщенная модель для исследования второго каскада амортизации приведена на рис 4.0. Отношение масс $M_1/M_2 \cong 20$. Это наиболее распространенное отношение масс первого и второго каскадов, сложившееся в практике проектирования, не всегда, как увидим ниже, является оптимальным, если используется нелинейная связь (ОП или демпфер с нулевой или незначительной жесткостью в зазоре). Парциальная частота массы M_1 на ударной жесткости связи 1 $f_1 = 15$ Гц и сохраняется неизменной во всех последующих расчетах, обеспечивая максимальный уровень ускорений $\ddot{y}_1 = 250$ м/с² и перемещения $y_1 = 29$ мм для массы M_1 (перед вторым каскадом амортизации).

На рис. 4.1 – 4.3 приведены динамические характеристики амортизированных масс M_1 , M_2 в зависимости от изменения основных параметров связей 4, 5, 6 второго каскада амортизации. При изменении жесткости связи 4 (рис. 4.1) динамические характеристики массы M_2 убывают после зоны колебаний типа биений, когда парциальные частоты f_1 , f_2 близки по своим значениям, хотя кратные частоты тоже приводят к некоторому увеличению ускорений массы M_2 . Встраивание в динамическую модель демпфера и увеличение коэффициента потерь может привести как к росту динамических характеристик (рис. 4.2, а, б), так и к появлению оптимальных, по параметрам демпфера, зон, когда динамические характеристики могут быть уменьшены (рис. 4.2, в, г). Все зависит от силы сопротивления ($C_{од6}$ – жесткость) нагрузочной части гистерезисной петли.

При встраивании ОП в ту же динамическую модель характер изменения динамических характеристик амортизированной массы M_2 еще более отличается от результатов, полученных для массы первого каскада амортизации. При общей тенденции увели-

чения перегрузок и уменьшения перемещений (рис. 4.3, а–г; кривые 2' для массы M_2) с увеличением жесткости (ось абсцисс) ОП есть зоны оптимальных динамических характеристик. При этом жесткость связи 4 (C_4) влияет на характер оптимальной зоны.

В динамических моделях (рис. 4.2 – 4.3) связи 5, 6 – это нелинейные связи (рис. 2). В пределах зазора δ_5 жесткость равна нулю (для ОП), а в пределах зазора δ_6 она незначительна и служит для восстановления элементов демпфера в номинальное положение. Нелинейность (при $\psi \cong 0$) связей 5 (6) приводит к значительному (в 2 – 2,2 раза) росту ускорений для принятого отношения масс и жесткостей первого и второго каскадов амортизации по сравнению со случаем, когда связь 5 (6) линейная (зазор отсутствует). На рис. 5 показано изменение динамических характеристик масс M_1 , M_2 в зависимости от отношения масс (ось абсцисс). При сохранении параметров связей отношение масс M_1/M_2 должно быть увеличено до 40 и более, чтобы уменьшить перегрузки. Естественно, частотные характеристики системы могут быть изменены (расстроены) и за счет ударных характеристик связей, т.е. уменьшением их жесткости. Но перемещения центров масс уже близки к предельно допускаемым по прочности внеопорных связей.

По-видимому, изменить в широких пределах сложившееся в практике проектирования отношение масс, как и допускаемый диапазон изменения параметров основных связей, не представляется возможным. Поэтому увеличение перегрузок на амортизированных массах второго каскада можно считать платой за обеспечение специальных режимов эксплуатации, когда дополнительные нелинейные связи второго каскада амортизации играют роль страховочных устройств при нестационарных воздействиях. Это совершенно не исключает оптимизации (рис. 4.2 – 4.3) выбора их параметров. За счет использования демпфера (демперных устройств) в первом каскаде амортизации необходимо, прежде всего, максимально погасить энергию внешнего кинематического воздействия, обеспечив меньшие уровни ускорений и перемещений перед вторым каскадом амортизации.

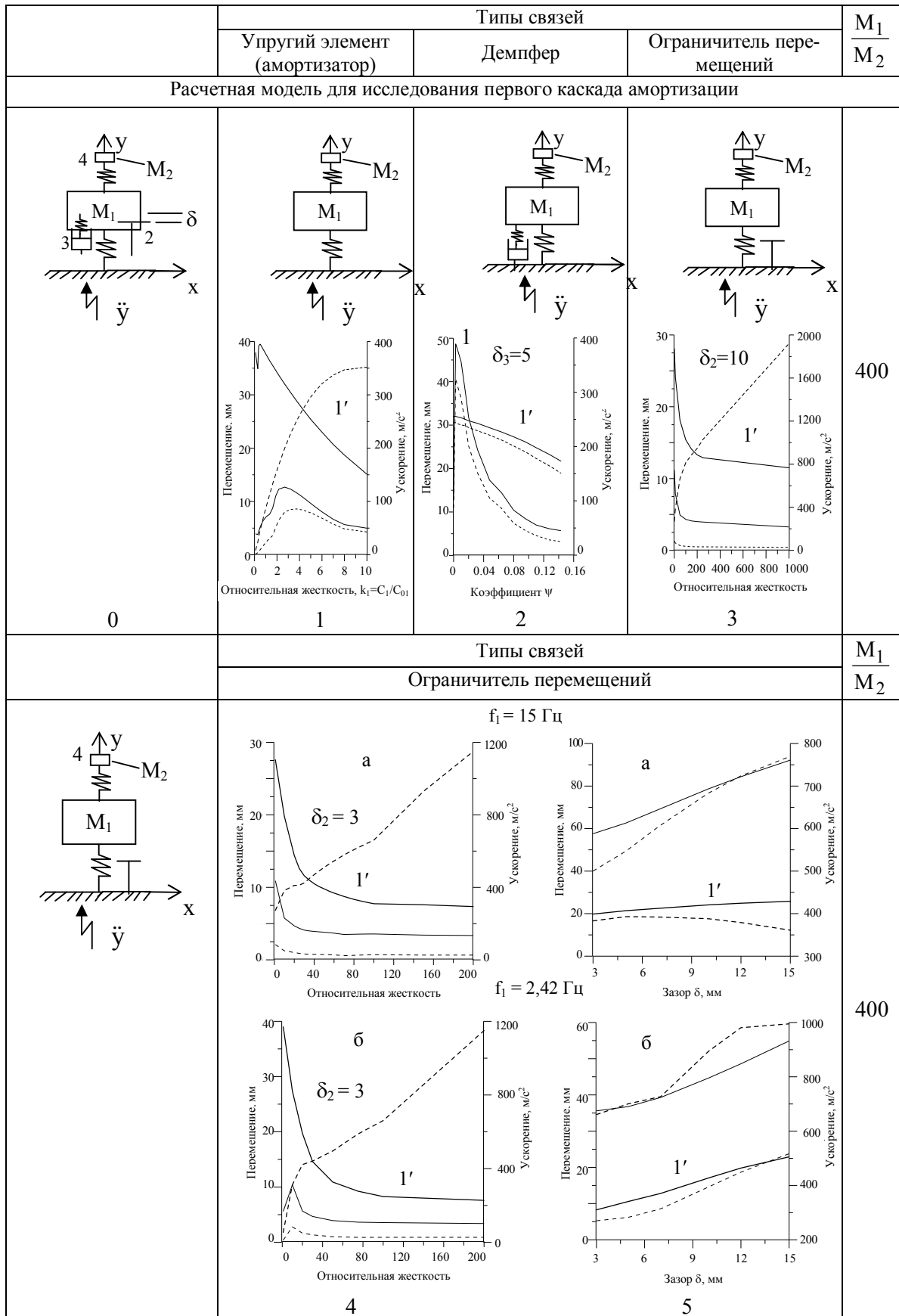


Рис. 3. Динамические характеристики амортизированных масс M_1 , M_2 в зависимости от изменения параметров связей **первого** каскада амортизации при кинематическом ударном воздействии: --- — ускорения, — — перемещения центров масс M_1 , M_2 ; 1' — для массы M_1 ; δ — зазор в мм

Расчетная модель для исследования второго каскада амортизации

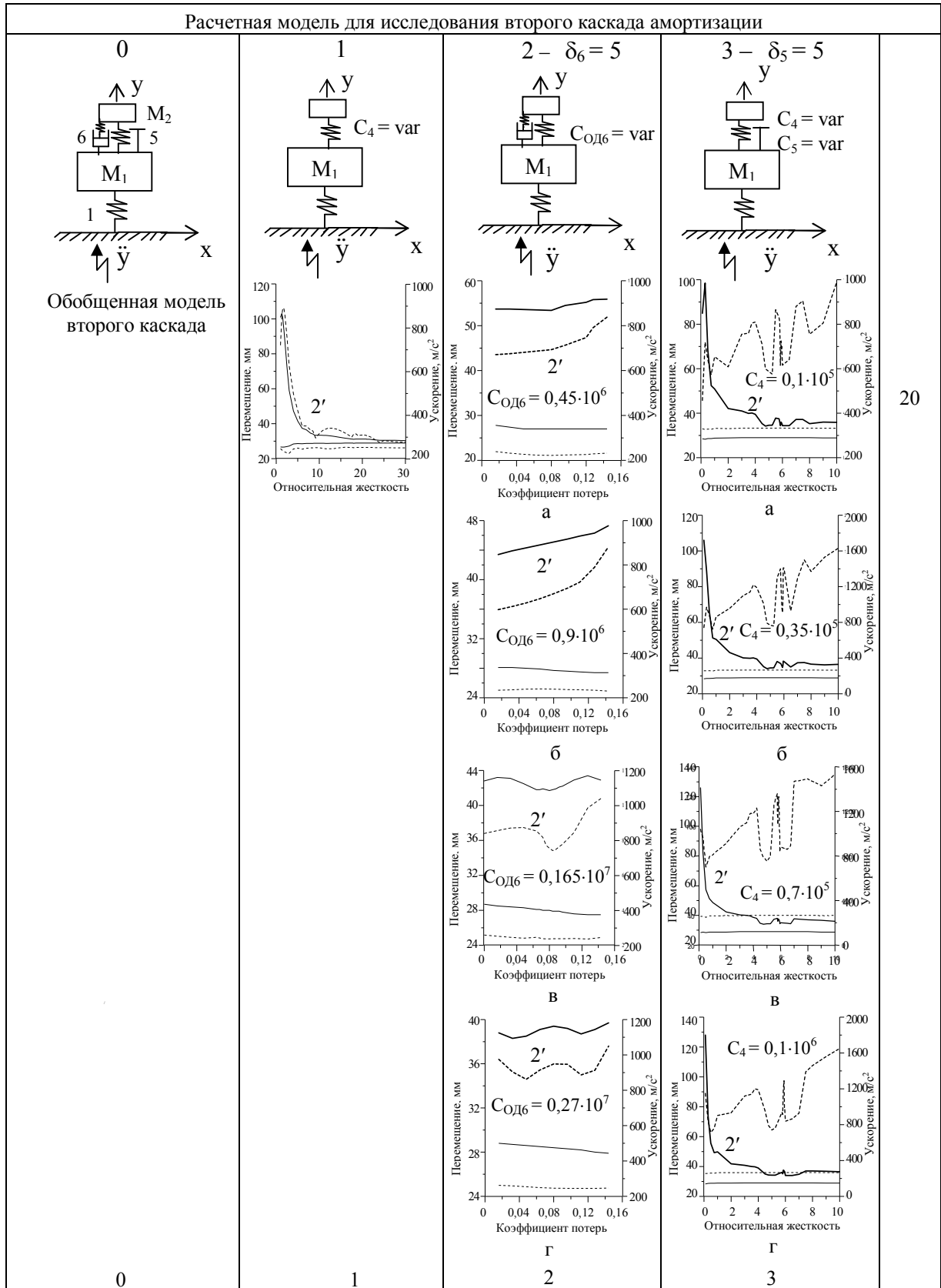


Рис. 4. Динамические характеристики амортизированных масс M_1 , M_2 в зависимости от изменения параметров связей второго каскада амортизации при кинематическом ударном воздействии: --- – ускорения; — — перемещения центров масс M_1 , M_2 ; 2' – для массы M_2 ; var – означает «изменение» параметра; C – жесткость в кН/м; индексы: 1... 6 – номер связи; ОД6 – относится к нагрузочной части гистерезисной петли демфера

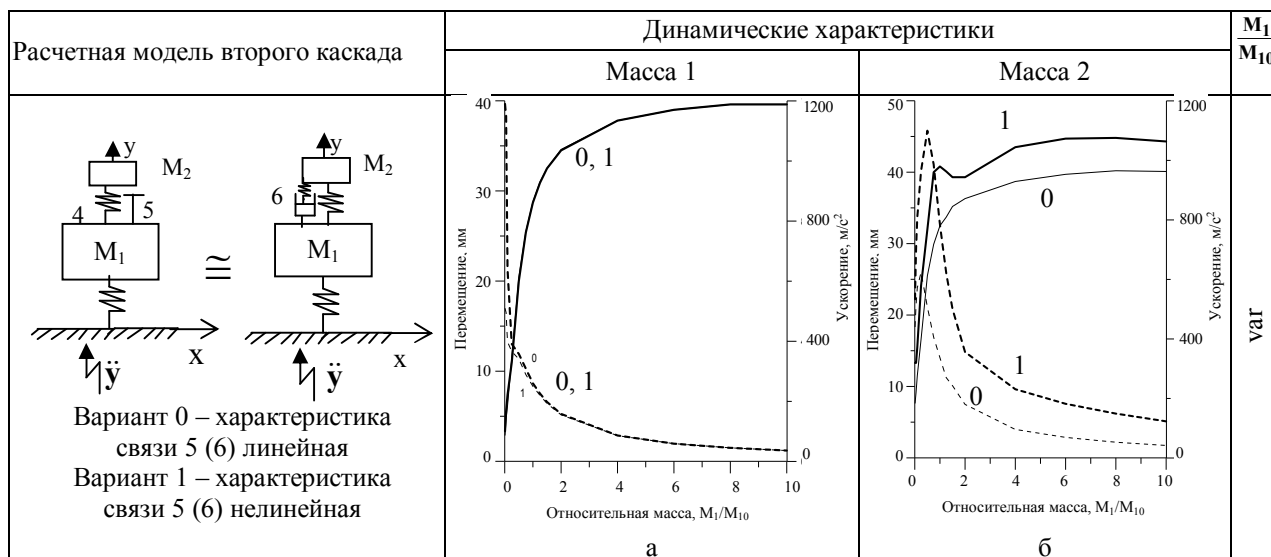


Рис. 5. Динамические характеристики амортизированных масс M_1 , M_2 в зависимости от отношения масс M_1/M_2 при кинематическом ударном воздействии (для двух вариантов исполнения связи 5 (6) и $\psi = 0$): - - - - ускорения, — — — — перемещения центров масс M_1 , M_2 ; 0, 1 – вариант исполнения связи 5 (6) при $\psi \cong 0$

В противном случае надо будет решать достаточно сложную задачу обеспечения ударостойкости оборудования (особенно для второго каскада амортизации).

Заключение

1. Только демпфер (демпферное устройство) в АК уменьшает динамические характеристики (и перемещения, и ускорения) оборудования.

2. Для масс второго каскада амортизации нелинейная характеристика связи (наличие зазора при $\psi \cong 0$) приводит к росту (в 2 – 2,2 раза) величин динамических характеристик по сравнению с результатами, полученными с линейной характеристикой этой связи. Для уменьшения динамических характеристик отношение масс первого и второго каскадов амортизации должно быть увеличено до 40 и выше.

3. Зазор в ОП не всегда приводит к росту динамических характеристик. Жесткость связи 4 (конструктивно необходимая для поддержания в номинальном положении оборудования) может обеспечить и уменьшение ускорений с увеличением зазора в ОП.

4. Оптимизация параметров связей второго каскада амортизации более эффективна при использовании демпфера (демпферных устройств) для максимально возможного погашения энергии внешнего воздействия первым каскадом амортизации.

Литература

1. Исследование нестационарных колебаний многомассовой амортизированной системы с демпферными устройствами во втором каскаде / В.И. Кирюхин, А.В. Кирюхин, В.Ф. Шатохин, Е.А. Циклин // Вестник машиностроения. – 2002. – № 9. – С. 13 – 16.
2. Шатохин В.Ф., Циклин Е.А. Исследование нестационарных колебаний многомассовой амортизированной системы с металлическими ограничителями перемещений во втором каскаде // Вестник машиностроения. – 2001. – № 12. – С. 6 – 11.
3. Инструкция по применению программ «Амортизация 2003». – Калуга-Москва, 2003. – 48 с.
4. Метод расчета сложных амортизированных систем на ударные воздействия / В.В. Болотин, В.И. Кирюхин, Е.Б. Карпин, В.Ф. Шатохин, Ю.П. Самсонов // Вопросы кораблестроения. Сер. Корабельные энергетические установки. – Л.: ЦНИИ «РУМБ». – 1976. – Вып. 2. – С. 99 – 107.

Поступила в редакцию 25. 05. 2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.Д. Ямпольский, Московский технический университет им. Н.Э. Баумана (Калужский филиал), КФМГТУ, Калуга.