УДК 534.1

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПРОТЯЖЕННЫМИ ВИБРОУДАРНЫМИ СИСТЕМАМИ (РЕЗОНАНСНЫЕ ДВИЖЕНИЯ)

© В.К. Асташев, В.Л. Крупенин

Аннотация. *Приведены результаты экспериментов с системами, оснащенными большим числом ударных пар. Показаны режимы движения, характерные для сильно нелинейным волновых систем. В качестве базовой – выбрана специфическая модификация системы типа «разряженные бусы». Эксперименты проводились на специально сконтструированном стенде.*

Ключевые слова: *виброударные системы с большим числом степеней свободы, сильно нелинейные стоячие волны, волны-«хлопки», нелинейные «формы» колебаний***.**

1. В работах [1—6] изучались динамические эффекты в распределенных системах, оснащенных многими параллельными ударными парами. В статьях [1—3] были приведены результаты экспериментальных исследований. До последнего времени наиболее изученными оказались системы двух типов: системы типа «разряженные бусы» [4] — одномерные распределенные системы, оснащенные некоторым числом дискретных ударных пар (до 10-12) и системы типа «концентрированные бусы» [4] — одномерные распределенные системы, оснащенные большим числом ударных пар. Концентрированные бусы хорошо моделируются посредством длинноволновых приближений уравнений движения. При этом соударения моделируется посредством введения распределенных ударных элементов [3, 4, 6] — систем, в которых длины волн, генерируемых в результате соударений, соизмеримы с размерами самой ударной пары. Динамика систем типа «разряженные бусы» зависит от геометрических и других факторов.

Для изучения весьма важного в приложениях случая, когда число ударных пар значительно, но расположены они относительно редко, так что переход к длинным волнам привел бы к неадекватным результатам, были разработаны установки «Аллигатор» и «Аллигатор 1».

Кроме того, следует заметить, что изучение рассматриваемого промежуточного случая наиболее сложно с теоретической точки зрения, так как соответствующие модели содержат большое число сильно нелинейных уравнений движения, причем континуализация сильной нелинейности [3, 4, 6], по-видимому, неэффективна. Именно поэтому роль экспериментального анализа особенно велика.

2. Схема экспериментальной установки показана на рис. I. Установка содержит многомассную колебательную систему, электромагнитные возбудители колебаний, ограничители колебаний с устройствами установки и регулировки зазоров, систему управления и возбуждения, комплекс контрольно-измерительной и питающей аппаратуры. Колебательная система выполнена в виде ленты *1* из бериллиевой бронзы с жестко закрепленными на ней на равных расстояниях друг от друга 10 шариками *2* диаметром 12 мм из закаленной стали. Лента заделана в микрометрических винтах *3,* которые установлены в щеках *4* основания *5* и позволяют регулировать натяжение ленты с помощью гаек *6.* Окончательная фиксация ленты после натяжения осуществляется защемлением в установленных на основании стойках 7, обеспечивающих жесткую заделку концов ленты, размеры которой составляют 1248 x 8 x 0,5. Каждый из 10 шариков размещен в зазоре между двумя электромагнитами *8* возбудителя колебаний, установленными с возможностью осевого перемещения в цилиндрических направляющих П-образных кронштейнов *9.* Центральные керны электромагнитов играют роль жестких

ограничителей хода колеблющихся шаров. Регулировка зазоров производится с помощью микрометрических винтов *10,* установленных в опорах *11* основания. Устройство регулирования позволяет жестко защемлять шарики, изменяя таким образом длину колебательной системы и количество колеблющихся шариков от 1 до 10. После установки необходимых величин зазоров производится жесткая фиксация положений электромагнитов. Питание электромагнитов производится от генератора Г (рис. 1, *а)* через усилитель У и систему управления СУ, схема которой показана на рис. 1, *б.* Первичная обмотка трансформатора Тр подключена к выходу усилителя. Питающее напряжение электромагнитов *8* формируется параллельно включенными диодами $Д_1$ и $Д_2$, и подводится к каждой паре электромагнитов через трехпозиционные тумблеры 1—Х так, что один из электромагнитов пары питается только положительными, а второй — только отрицательными полуволнами напряжения. Переключением тумблера из позиции 1 в позицию 3 фазировка питающего напряжения меняется на противоположную. В положении 2 электромагниты отключены. Таким образом, набором положений тумблеров организуется энергетически наилучшее по фазе возбуждение любой из форм колебаний механической системы. Частота и амплитуда сигнала генератора Г контролируются цифровым частотомером $Ч_1$, и вольтметром В.

Конструкция стенда позволяет в некоторых пределах регулировать собственные частоты колебательной системы изменением натяжения ленты с помощью микрометрических винтов. Изменение зазоров в ударных парах, образованных шариками и электромагнитами, дает возможность реализовать как безударные (линейные или квазилинейные), так и разнообразные виброударные процессы в присутствии односторонних и двусторонних ограничителей в системах с предварительным зазором или натягом.

3. Контроль работы стенда осуществляется с помощью комплекса измерительной и регистрирующей аппаратуры. Виброграф ВГ с бесконтактным измерительным преобразователем позволяет получать информацию о законе движения, амплитуде и частоте колебаний некоторого элемента колебательной системы. На экране встроенного в виброграф измерительного осциллографа воспроизводится закон движения контролируемого элемента. Стенд позволяет возбуждать виброударные процессы, частота которых не совпадает с частотой возбуждения от генератора.

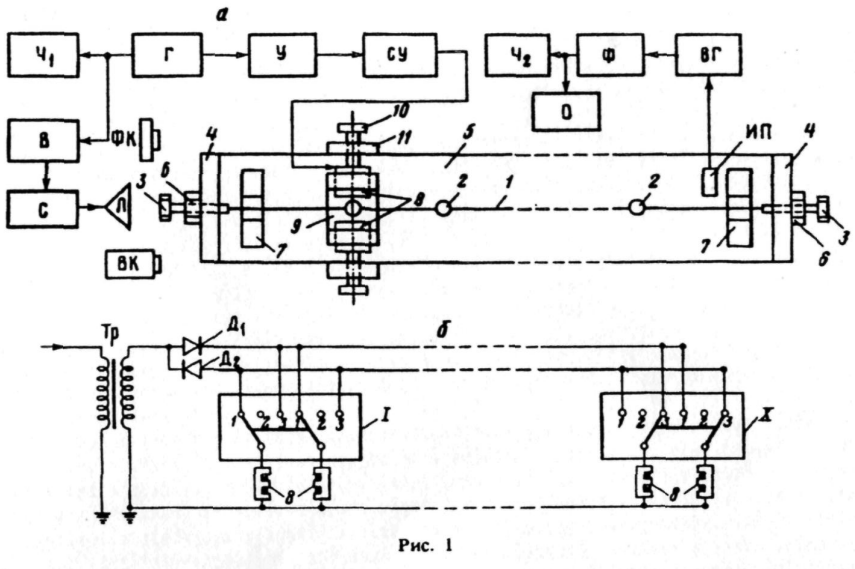


Рис. 1

Для их анализа и выявления спектральных составляющих, сигнал закона движения с выхода вибрографа подается на перестраиваемый полосовой фильтр Ф и параметры (амплитуда и частота) спектральной составляющей определяются с помощью контрольного осциллографа О и цифрового частотомера $Ч_2$. Для визуального наблюдения, идентификации и регистрации исследуемых процессов стенд снабжен стробоскопическим анализатором движения С с лампой Л. Частоту вспышек лампы стробоскопа можно синхронизировать с внешним сигналом от генератора. В этом случае при возбуждении периодических процессов с частотами, равными частоте возбуждения, в стробоскопическом свете наблюдается неподвижная форма ленты, которую можно зарегистрировать фотокамерой ФК. При включении внутренней синхронизации стробоскопа и введении малой частотной расстройки вспышек лампы по отношению к частоте исследуемого процесса наблюдается медленное движение ленты, которое фиксируется видеокамерой ВК. Полученные видеозаписи процессов можно обработать с помощью компьютерных анализирующих систем.

4. Рассмотрим некоторые результаты экспериментальных исследований. На первом этапе эксперимента определяли собственные частоты и формы колебаний без ударов об ограничители. С этой целью устанавливали максимально возможные зазоры между шариками и кернами магнитов, а уровень возбуждения выбирали минимально достаточным для того, чтобы визуально наблюдать форму ленты в стробоскопическом освещении. Фазировку питания электромагнитов (рис. 1) тумблерами 1-Х устанавливали такой, чтобы сила возбуждения действовала в направлении движения шарика. Например, при возбуждении первой, низшей, формы колебаний все электромагниты, расположенные с одной стороны ленты, запитываются в одной фазе. При возбуждении второй формы половина магнитов вдоль ленты включается в одной фазе, а другая — в противоположной. Эксперименты проводили при различных натяжениях ленты. В результате экспериментов обнаружено два вида колебаний: изгибные, при которых шарики совершают возвратно-поступательные движения в направлении действия электромагнитов; крутильные, при которых шарики совершают возвратно-вращательные движения вокруг оси продольной симметрии системы. Возбуждение всех 10 форм изгибных и крутильных колебаний показало, что частоты первых n= 1,..., 6 собственных форм с достаточно высокой точностью образуют арифметическую прогрессию

$$f_n = nf_1 \qquad (1)$$

где f_1— частота первой формы соответствующего вида колебаний. Например, для одного из натяжений ленты для изгибных колебаний f_1 = 32 Гц, а для крутильных f_1 = 37 Гц. Значения более высоких собственных частот отклоняются от зависимости (1).

Полученные экспериментально значения собственных частот достаточно хорошо согласуются с известными положениями теории механических систем с периодической структурой [6—8]. Заметим, что на первых формах колебаний рассматриваемая система ведет себя подобно некоторой эквивалентной струне с равномерно распределенной массой.

Наибольший интерес для последующего изучения виброударных процессов представляют изгибные колебания. Интенсивные визуально наблюдаемые виброударные процессы можно получить при существенно более высоком уровне возбуждения. Поэтому на следующем этапе эксперимента исследовали влияние уровня возбуждения на формы и частоты резонансных колебаний. С этой целью при максимальных зазорах между ограничителями уровень возбуждения выбирали предельно допустимым для того, чтобы гарантировать отсутствие соударений при резонансных колебаниях. В результате обнаружены некоторые новые свойства системы.

Во-первых, в окрестности некоторых из найденных собственных частот возбуждаются интенсивные резонансные изгибно-крутильные колебания. Для получения изгибных колебаний проводили «фильтрацию» колебаний при помощи поляризатора, представляющего собой тонкую пластинку с щелью, которую устанавливали в одном из узлов формы изгибных колебаний. Такой поляризатор полностью устраняет крутильную составляющую

колебаний; при этом амплитуда изгибных колебаний возрастает, поскольку энергия возбудителя расходуется только на их поддержание.

Во-вторых, наблюдались эффекты, обусловленные нелинейностью взаимодействия шариков с электромагнитами возбудителя колебаний. К этим эффектам относится возбуждение ультра- и субгармонических колебаний [5]. Например, частотой генератора 16 Гц возбуждаются колебания первой формы изгибных колебаний с частотой 32 Гц; частотами 12,8 и 21,3 Гц — колебания второй формы 64 Гц; частотами 32 и 48 Гц — колебания третьей формы 96 Гц; частотой генератора 152 Гц возбуждаются интенсивные изгибно-крутильные колебания с частотой 38 Гц, близкой к первой собственной частоте крутильных колебаний.

К этой же группе нелинейных эффектов относится и затягивание резонансных колебаний как в область высоких, так и низких частот. Аналогичные эффекты для системы с одной степенью свободы, возбуждаемой электромагнитами, наблюдались ранее в [5].

5. Рассмотрим виброударные процессы, устанавливающиеся в данной системе. Приводимые результаты отвечают случаям, когда 1-я собственная частота системы (в отсутствие соударений) f_1= 32 Гц, а ограничители симметрично установлены с зазорами Δ = 2 и 0,6 мм относительно каждого ударного элемента.

Эксперименты не выявили иных типов периодических виброударных процессов кроме разнообразных форм хлопков [3, 4, 6] и "очевидных" режимов с соударениями одного элемента в пучности какой-либо из форм, отвечающих линейным колебаниям. При этом именно хлопки становятся доминирующими периодическими режимами с ростом числа ударных элементов. При реализации хлопков, вообще говоря, не плоско поляризованные до их установления стоячие волны в большинстве случаев поляризуются, и это способствует возможности их эффективного наблюдения и описания.

Эксперименты были посвящены анализу свойств резонансных виброударных процессов, существующих при малой диссипации за счет малых сил возбуждения. Наличие или отсутствие хлопков оказалось практически не зависящим от точек приложения вынуждающих сил и их фазировки. Проведенные опыты показали, что рассматриваемые эффекты слабо чувствительны к конкретному виду возбуждающего воздействия. Если какой-либо эффект наблюдался при одном типе возбуждения (регулировке подлежит напряжение на обмотках электромагнитов и его фазировка на каждом возбудителе), то он "мог наблюдаться и при других типах возбуждения, если, конечно, данный тип возбуждения позволяет компенсировать действие диссипативных факторов.

6. *Формы хлопков.* Как и в системах с распределенными ударными элементами[3, 4, 6], были обнаружены плоско поляризованные трапециевидные формы стоячих волн, аналогичные соответствующим формам линейных систем в смысле чередования узлов и пучностей, а также наличия и некоторых других свойств, например возможности получать профили высших "многотрапециевидных" форм длинной системы из низших одно- и двухтрапециевидных форм системы кратной длины с сохранением соответствующих частотных соотношений. В силу нелинейности системы речь не может вестись о полной аналогии с основными свойствами собственных форм линейных колебаний. Оговорив это, будем пользоваться далее термином "форма" без новых оговорок и без кавычек.

Трапециевидная форма хлопка возникает уже при двух ударных элементах (ср. [3]). На рис. 2 в качестве примера даны изображения трех первых трапециевидных форм

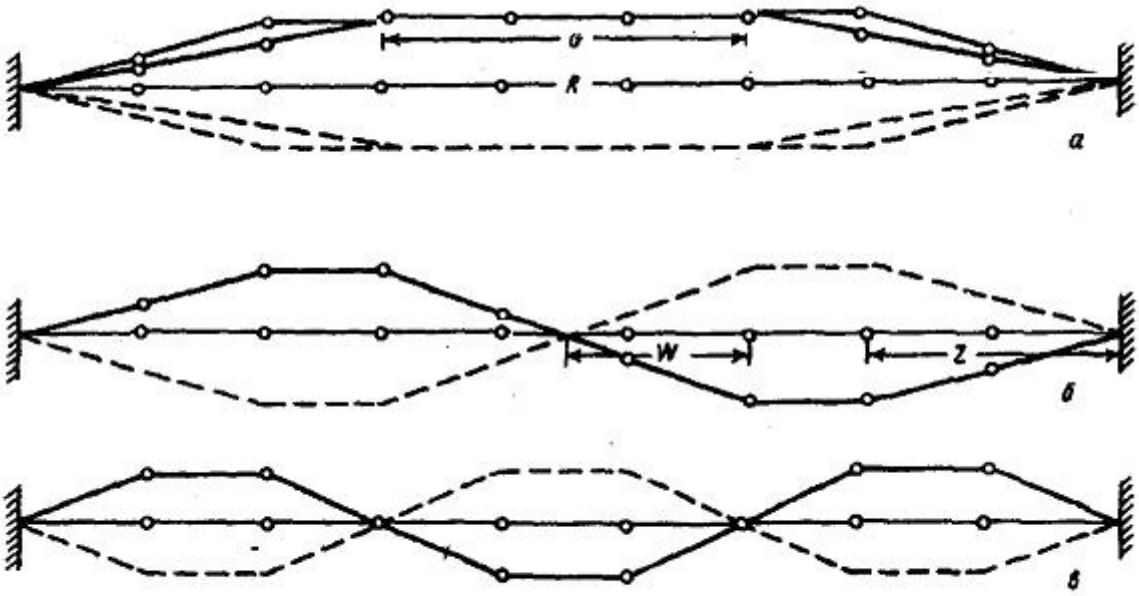


Рис. 2

колебаний при стробоскопическом освещении в случае, когда число ударных элементов n= 8.

Первая форма (рис. 2, *а)* наблюдалась при частоте $f>f_1$ = 39 Гц; вторая форма (рис. 2, б) наблюдалась при $f>f_2$ = 79 Гц; третья форма (рис. 2, *в)* - при $f>f_3$ = 117 Гц. При этом первая и вторая формы фиксировались при Δ = 2 мм, а третья форма - при Δ = 0,6 мм, что, естественно, связано с большей диссипацией энергии на более высоких частотах. Отметим, что при реализации таких форм, соударяются, вообще говоря, не все ударные элементы. В рассмотренном случае, например, при колебаниях по первой форме соударялись лишь шесть шаров; два крайних - до упоров не доходили. Однако режимы, при реализации которых возможны соударения всех ударных элементов, также фиксировались. (Это замечание особенно относится к низшим формам колебаний и случаям малых зазоров.)

Следует отметить, что профили реализуемых стоячих волн, которые "конструируются" из различных трапеций, могут быть классифицированы по признаку "равнобочности": может ли данный профиль рисоваться только посредством некоего набора равнобочных трапеций (таковы всегда первые формы) или здесь необходимо присутствуют и неравнобочные трапециевидные фрагменты. Подобная проблема не возникает в системах с однородными распределенными ударными элементами; ее появление связано с неоднородностью данного объекта ввиду наличия в нем массивных включений. На рис. 2, *а,* в, например, профили первой и третьей форм составлены из равнобочных трапеций, а профиль второй формы (рис. 2, б), в которой узел расположен между ударными элементами, - из неравнобочных трапеций.

Опыты показали, что реализуемость тех или иных форм колебаний существенно зависит от выполнения некоторых "предельных" соотношений между малым *G* и большим *R* основаниями трапеций (рис. 2), составляющих профиль распределенного элемента, а также от показателя неравнобочности трапеций. Таким показателем может служить, например, отношение проекций *W* и Z боковых сторон трапеций на ось статического равновесия распределенного элемента

В результате опытов на стенде "Аллигатор1" было обнаружено, что в системах с различным количеством ударных элементов реализуются только такие трапециевидные формы, у которых отношение меньшего основания к большему *GIR* ≥0,2, а показатель неравнобочности
0,67 ≤*W/Z* ≤ 1. Отсюда следует, что для систем с большим числом ударных элементов имеется их минимальное количество, вовлекаемое в хлопок. Например, при реализации симметричных *(W/Z*=1) стоячих волн, показанных на рис.2, *а*, отношение G/R>0,2. В тоже время трапециевидная форма, содержащая лишь два центральных шара,

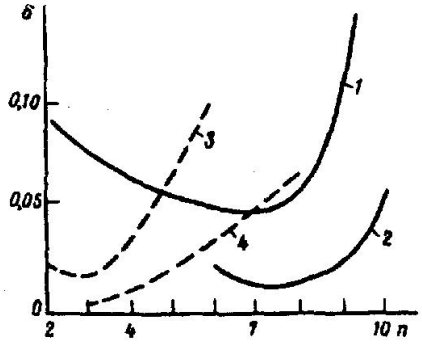


Рис. 3

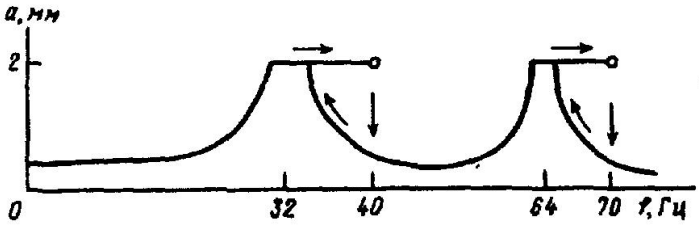


Рис. 4

не реализовывалась, так как здесь $GIR = 0{,}11 < 0{,}2$. При реализации несимметричной стоячей волны, показанной на рис. 2, *б,* отношение $GIR = 0{,}22 > 0{,}2$, а $WIZ = 0.75 > 0{,}67$.

Отмеченные обстоятельства связаны, по-видимому, с необходимостью выполнения некоторых специфических энергетических соотношений, в которые входят параметры, напрямую определяемые потенциальной энергией стоячих волн, конфигурации которых априори могут существенно различаться (ср. [4]). Следует, однако, заметить, что полного теоретического обоснования этого феномена, по-видимому, нет. Заметим также, что приведенные выше предельные значения отношений параметров системы присущи лишь данной установке. Для других установок они могут отличаться от приведенных.

Отсутствие теоретического обоснования описанного феномена объясняется, в частности, достаточной сложностью модели явления: наблюдаемые волны, из которых рождаются хлопки, вообще говоря, неплоскополяризованные; в ряде случаев удары не могут быть признаны центральными; при реализации некоторых типов движений можно говорить о существенном влиянии геометрических нелинейностей и т.д.

7. Динамические эффекты. Как и во многих других случаях экспериментального и (или) теоретического изучения хлопков [3-6], проделанные опыты выявили аналогию между поведением традиционных виброударных систем с одной сосредоточенной ударной парой и системами с распределенным элементом при реализации в последних разнообразных трапециевидных стоячих волн. При этом в отличие от экспериментов, описанных, в частности, в работе [4], где стенды содержали малое количество ударных пар ($2 < n < 4$), в опытах на установке "Аллигатор1" удалось реализовать трапецевидные формы хлопков в системах высокой размерности ($2 < n < 10$).

Затягивание по частоте. Показано, что все найденные типы трапециевидных стоячих волн могут быть затянуты от частоты, близкой к частоте соответствующей данной форме линейных колебаний до частоты "срыва" колебаний, лежащей выше начальной частоты, т.е. колебания носят жестко анизохронный характер. Установлено, что размер частотного диапазона затягивания уменьшается при реализации высших форм хлопков. На рис. 3 показаны зависимости величины частотного диапазона δ затягивания, отнесенной к соответствующей собственной частоте системы, от числа л ударных элементов в системе. Кривые 1 и 2 получены при $\Delta = 2$ мм для первой и второй форм соответственно. Уменьшение величины частотного диапазона связано с возрастанием диссипации при увеличении частоты на более высоких формах.

Из рис. 3 видно, что при реализации низших (первой и второй) форм функции δ(n) немонотонны (кривые 1 и 2), причем, оказалось, что при равных зазорах минимумы этих функций отвечают одному и тому же количеству шаров в системе (n= 7). Значения n, отвечающие минимумам, зависят также от величины зазора Δ. Кривой 3 на рис. 3 представлена зависимость δ(n) для второй формы при $\Delta = 0{,}6$мм, минимум которой реализуется при $n = 3$. При установлении более высоких форм величины диапазонов затягивания возрастают с ростом n и экстремумы не

наблюдаются (см., например, кривую *4,* которая экспериментально получена на третьей форме колебаний при Δ = =0,6 мм).

Наличие экстремумов (кривые 1-3*)* может объясняться проявлением на низших формах двух противоречивых тенденций: увеличением диссипации при увеличении числа ударных элементов и уменьшением частоты (и, следовательно, уменьшением роли диссипативных факторов) при удлинении распределенного элемента.

Зависимость положения экстремумов (кривые 2, 3*)* от величины зазора определяется, по-видимому, различием скоростей перемещения ударных элементов между ограничителями при фиксированной частоте. При уменьшении зазоров потери энергии при ударах падают быстрее, чем другие диссипативные потери, которые оказываются основными. Этим объясняется вид кривой 4*,* не имеющей экстремума, для высших форм, которая на данном стенде реализуется, начиная с третьей формы стоячей волны.

Срыв, двузначность, жесткий запуск. После реализации предельных частот затягивания при дальнейшем увеличении частоты каждая трапециевидная стоячая волна "срывается", т.е. виброударный процесс исчезает и при синусоидальном возбуждении устанавливаются линейные стоячие волны в пределах ограничителей.

При уменьшении частоты возбуждения после прохода частоты срыва линейные волны не исчезают, а трапециевидные - не появляются. Для их получения приходится либо сильно уменьшать частоту, т.е. фактически вернуться к левой границе интервала затягивания, либо (как и в случае традиционных виброударных систем с одной ударной парой) придать системе запускающий импульс, достаточный для установления трапециевидных волн при тех же частотах возбуждения. Это свойство двузначности вполне аналогично известному свойству традиционных систем с одной ударной парой [3, 4]. Пользуясь той же аналогией, придание упомянутых запускающих начальных условий будем называть "жестким запуском" [3, 4]. Данные эффекты сопровождают все типы периодических трапециевидных стоячих волн.

На рис. 4 даны амплитудно-частотные характеристики одной из систем при n = 10, Δ = =2 мм для двух низших форм колебаний (ср. [3, 6]). Здесь амплитуда a - полуразмах колебаний синхронно соударяющихся ударных элементов; f- частота колебаний. На рисунке обозначены собственные частоты системы f_1 = 32 Гц и f_2 = 64 Гц и соответственно частоты срывов виброударных процессов: 40 и 70 Гц. При реализации первой формы в процесс вовлекалось восемь ударных элементов; при реализации второй формы - по четыре ударных элемента для каждой полуволны. Стрелками на рис. 4 показано направление изменения частоты на участках двузначности амплитудно-частотной характеристики.

8. *Поляризация*. При реализации изгибных колебаний распределенного элемента во многих частотных диапазонах одновременно реализуются и крутильные колебания, имеющие свой спектр собственных частот. В ряде случаев крутильные колебания на собственных частотах при увеличении возбуждения порождают интенсивные изгибно-крутильные стоячие волны с возможностью, установления виброударных процессов. Как указывалось выше, установлено, что наличие соударений приводит к поляризации волн, и в результате изгибно-крутильные волны трансформируются в изгибные поляризованные трапецевидные волны.

Например, для простого случая с n = 1 собственная частота изгибных колебаний f = =170 Гц, а собственная частота крутильных колебаний f = 191 Гц. При возрастании уровня возбуждения крутильных колебаний с последующим затягиванием по частоте наблюдалась поляризованная стоячая волна с соударениями ударного элемента. Частота срыва изгибной волны f = 214 Гц. Аналогичные явления регистрировались и для трапециевидных волн при их установлении на собственных частотах крутильных волн.

9. Материал, приведенный в данной работе, очевидно, далеко не исчерпывает разнообразные динамические эффекты, проявляющиеся в данной системе:

локализованные колебания, волны со сложными профилями, почти периодические стоячие волны и многие подробное описание этих и других явлений предполагается провести в дальнейшем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-08-00500).

Литература

1. В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, А.Н. Тресвятский. Экспериментальное исследование синхронизации ударов в распределенных системах с параллельными ударными парами \\ ДАН. 1996. т. 351. №1. С. 44 – 47.
2. В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, А.Н. Тресвятский. Экспериментальное исследование синхронизации ударов в распределенных системах с варьируемым числом ударных пар \\ Проблемы машиностроения и надежности машин. 1996. № 2. С. 96 – 101.
3. В.К. Асташев, В.Л. Крупенин. Волны в распределенных и дискретных виброударных системах и сильно нелинейных средах. \\ Проблемы машиностроения и надежности машин, 1998, № 5, с. 13-30.
4. V.L. Krupenin. Vibro-Impact Processes in Systems with Large Number Impact Pairs and Distributed Impact Elements // Dynamics of vibro-impact systems. Euromech Colloquium 386. September, 1998. Loughborough University, England, 1998.
5. Babitsky V.I., Krupenin V.L. Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems. Springer 2001, 330 p.
6. Крупенин В.Л. О развитии методов частотно-временного анализа для расчета составных систем с большим числом ударных пар. // Проблемы машиностроения и надежности машин. - №6, 2008. -С.40-51

Поступила: 30.04.10