

ДИНАМІКА ТА МІЦНІСТЬ МАШИН

УДК 539.3

Костенко Ю.В., Ткачук Н.А., докт. техн. наук; Грабовский А.В., канд. техн. наук;
Ткачук Н.Н., канд. техн. наук

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ХАРАКТЕР ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИБРОУДАРНЫХ СИСТЕМАХ

Введение. В статье [1] была поставлена задача о моделировании динамических процессов в виброударных системах с частичным разрушением технологического груза. Для определения силы ударного взаимодействия в простейших виброударных системах (рис. 1) применяется процедура ее идентификации путем сравнения, с одной стороны, результатов экспериментов, а с другой – результатов численного интегрирования системы уравнений.

$$\{m_1\ddot{\omega}_1 + C_1\dot{\omega}_1 + H_1\omega_1 + A\sin \omega t + m_1g + F = 0; m_2\dot{\omega}_2 + m_2g - F = 0. \quad (1)$$

где ω_1 и ω_2 - с точностью до направления перемещения тел 1 и 2 с массами m_1, m_2 ; C_1, H_1 - коэффициенты жесткости и вязкости системы подрессоривания тела 1; A, ω - амплитуда и круговая частота внешней возбуждающей гармонической силы; g - ускорение свободного падения [1].

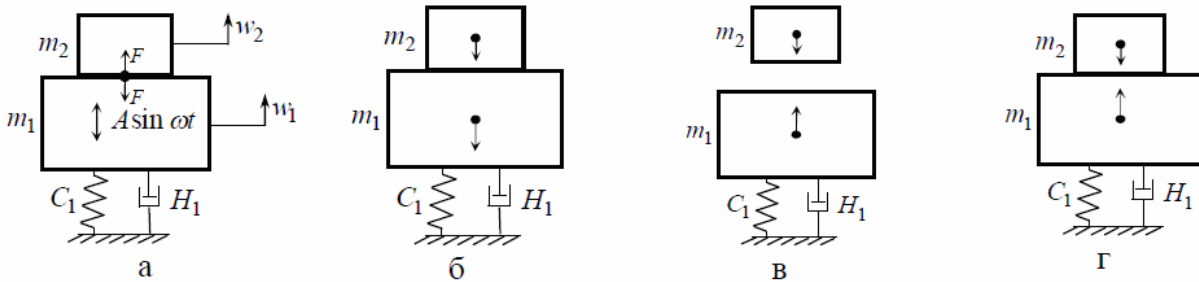


Рис.1. Виброударная система, состоящая из двух тел

Основная идея, предложенная в статье [1], состоит в новом представлении неотрицательной силы ударного взаимодействия F в виде функции относительного сближения $\zeta = (w_1 - w_2)$ грузов 1 и 2 и скорости $\dot{\zeta}$, причем:

$$F = F(\zeta, \dot{\zeta}) \quad F = 0 \text{ при } \zeta < 0; \quad F = F^{\wedge} \geq 0 \text{ при } \zeta \geq 0; \quad (2)$$

$$F(\zeta, \dot{\zeta}) = F(\zeta, 0), \dot{\zeta} < 0; \quad F(\zeta, \dot{\zeta}) > F(\zeta, 0) \text{ при } \dot{\zeta} > 0. \quad (3)$$

При этом в первом квадранте ($\zeta > 0, \dot{\zeta} > 0$) функция F совпадает с ее представлением в виде степенного или иного функционального ряда, в частности, ряда Тейлора:

$$F^{\wedge}(\zeta, \dot{\zeta}) = \alpha_1\zeta + \alpha_2\dot{\zeta} + \alpha_3\zeta\dot{\zeta} + \dots \quad (4)$$

Как отмечается в статье [1], данные представления дают возможность восстановить функцию F^{\wedge} в первом квадранте по значениям коэффициентов α при степенях $\zeta, \dot{\zeta}$. Частичные суммы ряда дают некоторое приближение F . И при этом возникают две задачи: определение количества удерживаемых членов того или иного ряда и определение коэффициентов α . В статье [1] предложен алгоритм идентификации коэффициентов α ряда (4) путем минимизации функционала несоответствия временных распределений $F(t)$, получаемых, с одной стороны, численным, а с другой — экспериментальным путем. В то же время отмечено, что представляет также интерес анализ влияния количества членов ряда (4) и его коэффициентов на характер динамического процесса в исследуемой виброударной системе.

Действительно, отвлекаясь от задачи идентификации коэффициентов α ряда (4), можно произвольно или целенаправленно варьировать эти самые коэффициенты, тем самым предопределяя поведение виброударной системы, описываемой уравнениями (1). Установление влияния задаваемых коэффициентов в представлении (4) силы ударного взаимодействия на динамику виброударного процесса составляет цель данной работы.

Постановка задачи. Рассматривается виброударная система, описанная в [1-4]. Для определенности задавались следующие значения параметров: $m_1 = 15960$ кг, $m_2 = 0,5m_1$, $C = 5280$ кН/м, $H = 127680$ Н·с/м, $A = 293$ кН, $\nu = 16$ Гц.

Установившийся периодический процесс определяется путем численного интегрирования системы уравнений (1) методом Рунге-Кутты при нулевых начальных условиях. Влияние различных факторов на поведение виброударной системы (1) исследуется путем варьирования количества и типа членов в разложении функции F (4).

В качестве информативных данных о поведении исследуемой виброударной системы выбраны: временные распределения w_1, \dot{w}_1, ζ ; временные распределения F ; длительность τ контактного взаимодействия в случае установившегося процесса движения; фазовые диаграммы в плоскостях (w_1, \dot{w}_1) и (w_2, \dot{w}_2) .

При рассмотрении различных математических моделей для удобства идентификации составляющих предлагается ввести матрицу «сводных» идентификаторов. В общем виде она будет иметь следующий вид: $I = \text{iden}(O_{(1)}, O_{(2)} \dots O_{(n)})$.

Рассмотрим несколько характерных случаев влияния каждой составляющей силы на поведение виброударной системы. Здесь цифра 1 либо 0 показывает, включено слагаемое той или иной силы в разрешающую систему уравнений или нет. Весовые коэффициенты в данном случае выбраны равными 1. Весовые коэффициенты для внутренних сил в реальной конструкции предлагается определять при помощи экспериментальных исследований на опытной конструкции [1].

Схема «сводных» идентификаторов составляющих будет иметь следующий вид (рис. 2). В случае аппроксимации неизвестной силы комплексной (наиболее полной) вязкоупругой моделью (в схеме сводных идентификаторов модель представлена под номером 7), она имеет в своем составе все 4 компоненты (см. рис. 2). Общий вид силы ударного взаимодействия в фазовом пространстве примет вид, представленный на рис. 3.

Анализ моделей. Ниже рассматриваются более подробно модели, приведенные в таблице (см. рис 2). Для них приводятся выражения силы, а также результаты моделирования в графическом виде. Все результаты приводятся в безразмерном виде. В качестве базового случая (к характеристикам которого отнесены все контролируемые величины) была выбрана модель с *полным* набором параметров в системе, номер 7 (см. рис. 2).

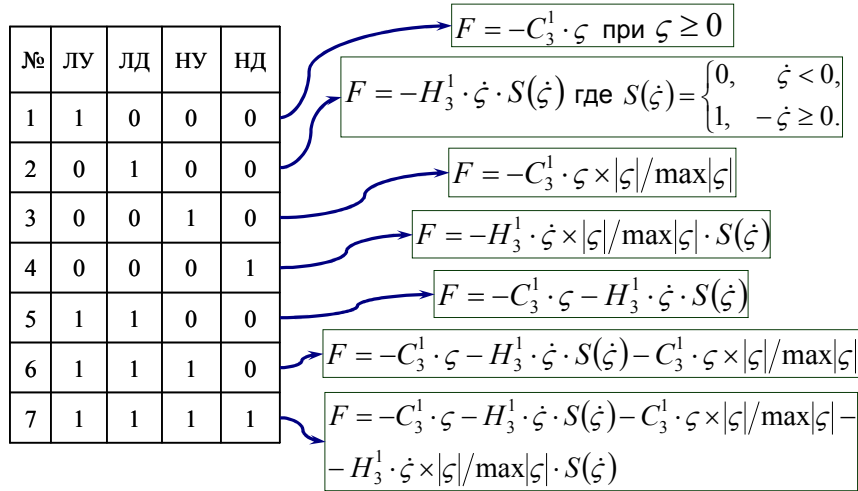


Рис. 2. Схема «сводных» идентификаторов составляющих силы ударного взаимодействия: ЛУ – «линейная упругая» компонента (линейно зависит от перемещений); ЛД – «линейная дифференциальная» компонента (линейно зависит от скорости); НУ – «нелинейная упругая» компонента (пропорциональная квадрату перемещений); НД – «нелинейная дифференциальная» компонента (пропорциональная произведению перемещения и скорости)

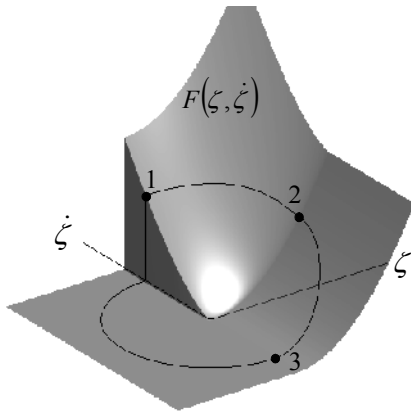


Рис.3. Общий вид внутренней силы ударного взаимодействия в фазовом пространстве $\zeta, \dot{\zeta}$ [1]

Влияние компоненты, линейно зависящей от перемещения. Общий вид слагаемого для выражения силы в данном случае:

$$F = C_3^1 \cdot (w_2 - w_1) = -C_3^1 \cdot \zeta \text{ при } \zeta \leq 0. \quad (5)$$

На графиках (рис. 4-9) приводятся безразмерные временные распределения и фазовые траектории.

Из приведенных результатов стоит отметить, что в приведенной математической модели виброударной системы нет «равноударного» установившегося режима, т.е. с периодом возмущения $T = 2\pi / \omega$. Система обладает двумя чередующимися различными по длительности и амплитуде ударами на двойном периоде возмущения, что обуславливает наличие субгармонического режима.

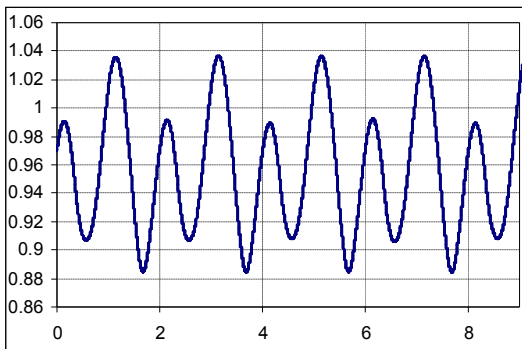


Рис.4. Распределение относительной величины $w_1(t)$ в относительном времени на установившемся режиме

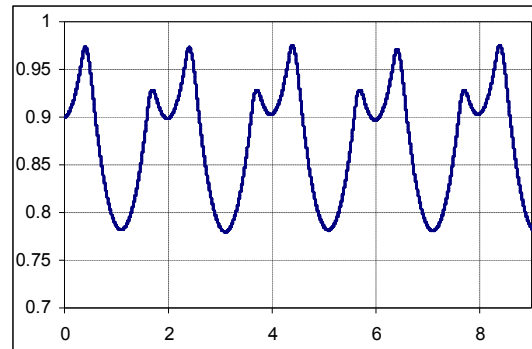


Рис.5. Распределение относительной величины $w_2(t)$ в относительном времени на установившемся режиме

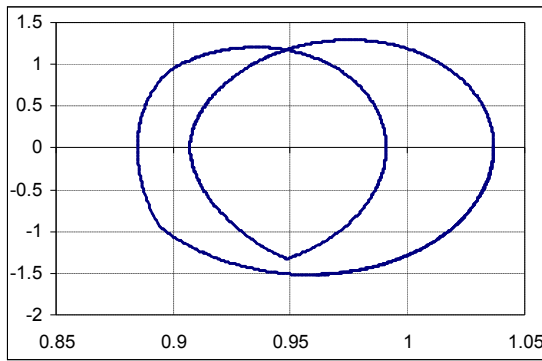


Рис. 6. Фазовая диаграмма в плоскости (w_1, \dot{w}_1) (относительные величины)

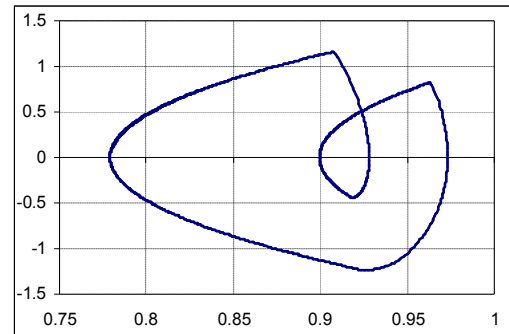


Рис. 7. Фазовая диаграмма в плоскости (w_2, \dot{w}_2) (относительные величины)

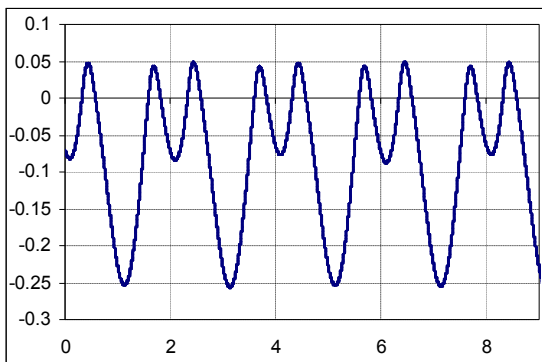


Рис. 8. Разность распределений $w_1 - w_2$ на установившемся режиме (относительная)

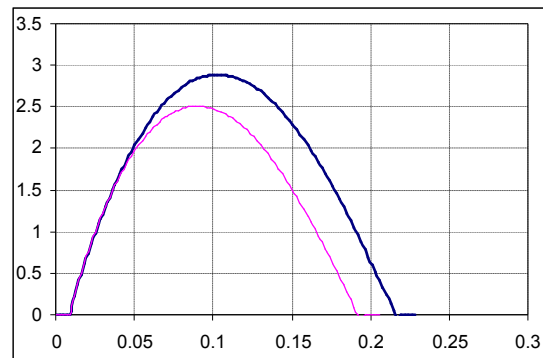


Рис. 9. Характер временного распределения компоненты силы ударного взаимодействия, линейно зависящей от перемещения

При исследовании вида решения системы в фазовой плоскости можно сделать вывод, что оно представляет собой замкнутые кривые, что свидетельствует об установившемся и устойчивом режиме, однако их траектория пересекается, поскольку получаемый режим повторяется через 2 периода, т.е. наблюдается субгармонический режим.

Также диаграммы на фазовых плоскостях имеют «изломы» в траектории, что характерно для виброударных систем.

Влияние компоненты, линейно зависящей от скорости. Общий вид выражения для определения силы следующий:

$$F = -H_3^1 \cdot \dot{\zeta} \cdot S(\dot{\zeta}), S(\dot{\zeta}) = 1, \dot{\zeta} \geq 0; \quad 0, \dot{\zeta} < 0. \quad (6)$$

Результаты приведены на рис. 10 - 15. Из приведенных графиков можно сделать вывод, что введенное слагаемое значительно увеличивает длительность удара, что приводит практически к «прилипанию» двух тел. Такое поведение системы на графиках фазовых плоскостей проявляется приближением их фактически к эллипсу, однако в момент максимальной величины силы присутствует небольшое возмущение.

Влияние компоненты, пропорциональной квадрату перемещения. Общий вид слагаемого силы записывается следующим образом:

$$F = -C_3^1 \cdot \zeta \times |\zeta| / \max|\zeta|, \zeta \leq 0. \quad (7)$$

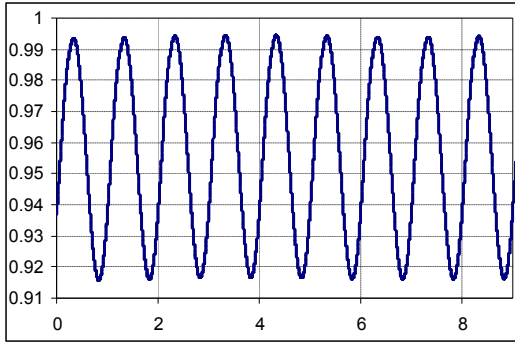


Рис. 10. Распределение относительной величины $w_1(t)$

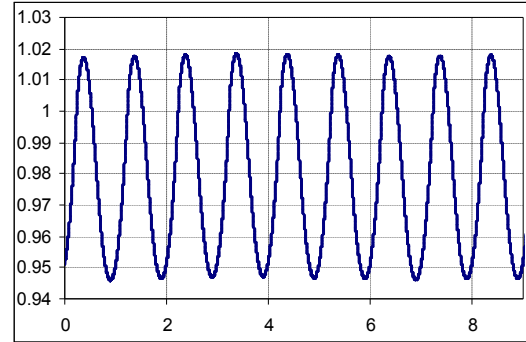


Рис. 11. Распределение относительной величины $w_2(t)$

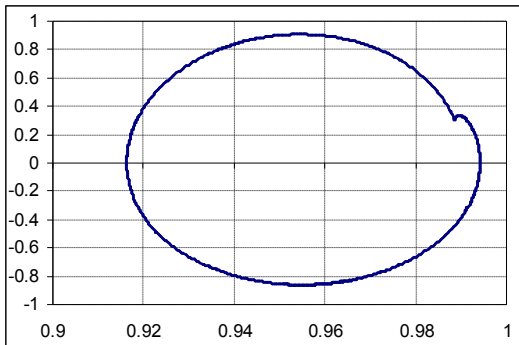


Рис. 12. Фазовая диаграмма (w_1, \dot{w}_1)

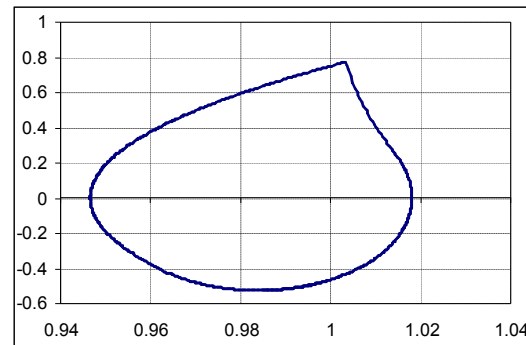


Рис. 13. Фазовая диаграмма (w_2, \dot{w}_2)

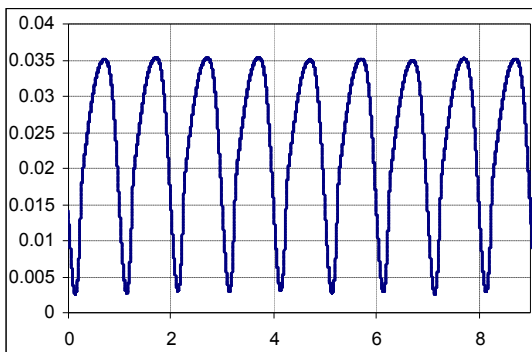


Рис. 14. Разность распределений $w_1 - w_2$

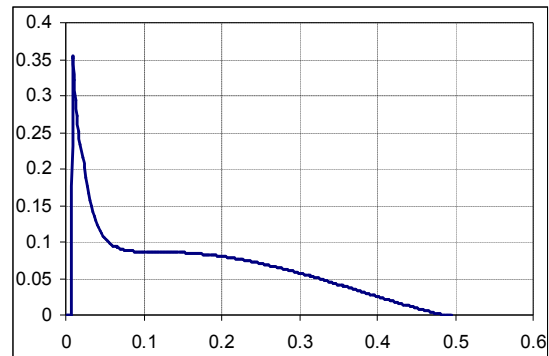


Рис. 15. Характер распределения компоненты силы, пропорциональной скорости

Картины распределения различных величин приведены на рис. 16 - 21. Анализируя графики, можно заключить, что при действии нелинейной упругой компоненты силы поведение системы, как и при 1-м случае, не имеет «равноударного» установившегося решения, но «разноударность» приобрела менее неравномерный характер. Однако в этом случае получается слишком большое внедрение, что влечет за собой достаточно длительную фазу соударения. Фазовые диаграммы в таком случае схожи с диаграммами при «чисто» вязкой силе, однако сохраняется две петли, как и в случае 1.

Влияние компоненты, пропорциональной произведению скорости и перемещения. Общий вид выражения для силы записывается следующим образом:

$$F = -H_3^1 \cdot \dot{\zeta} \times |\zeta| / \max|\zeta| \cdot S(\dot{\zeta}). \quad (8)$$

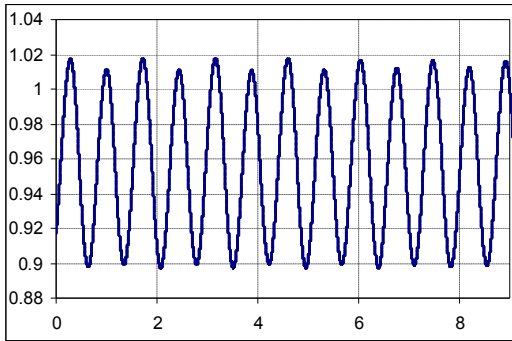


Рис. 16. Распределение $w_1(t)$

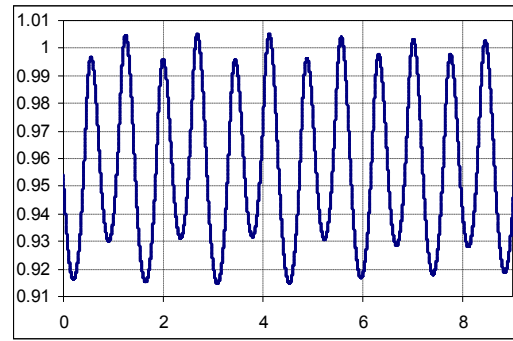


Рис.17. Распределение $w_2(t)$

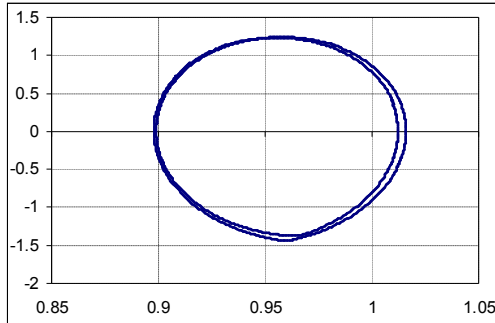


Рис. 18. Фазовая диаграмма (w_1, \dot{w}_1)

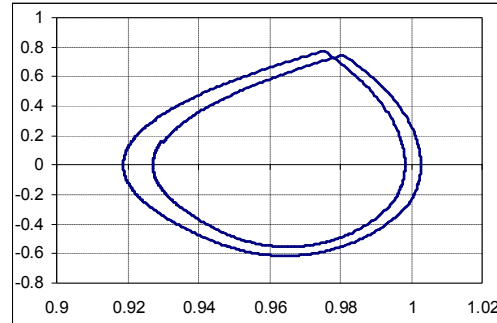


Рис. 19. Фазовая диаграмма (w_2, \dot{w}_2)

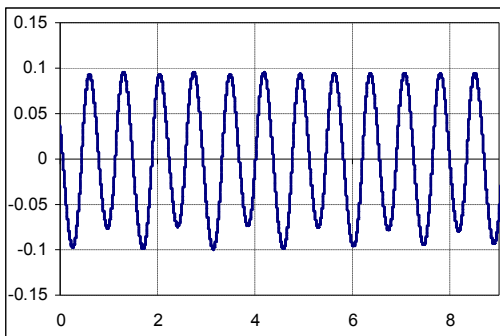


Рис. 20. Разность распределений $w_1 - w_2$

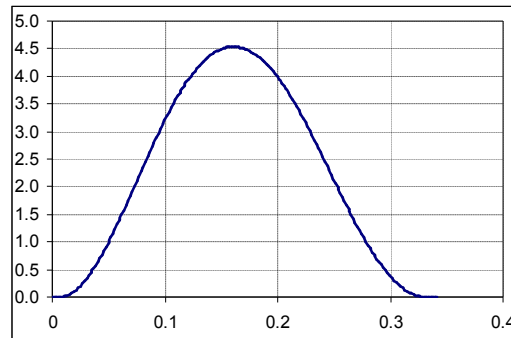


Рис. 21. Характер распределения компоненты силы ударного взаимодействия, пропорциональной квадрату перемещения

Результаты численного интегрирования приведены на рис. 22 - 27.

При задании в модели только нелинейной вязкой силы два тела слипаются, проникают одно в другое и колеблются как в «вязкой жидкости», причем на фазовых диаграммах траектории движения - практически невозмущенный эллипс.

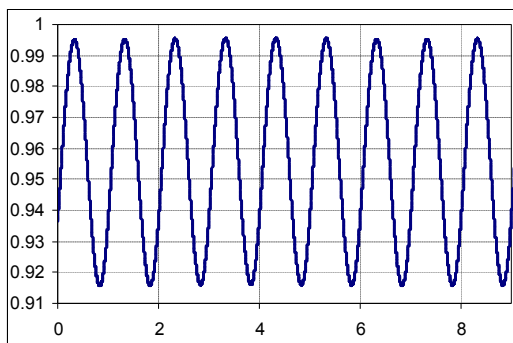


Рис. 22. Распределение $w_1(t)$

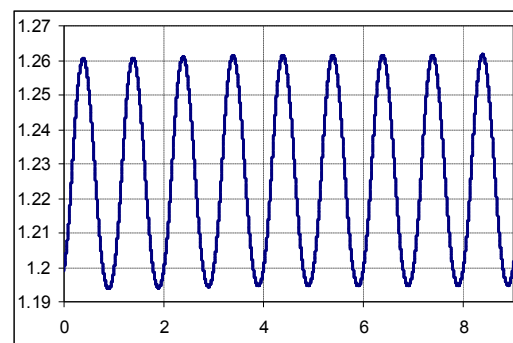


Рис.23. Распределение $w_2(t)$

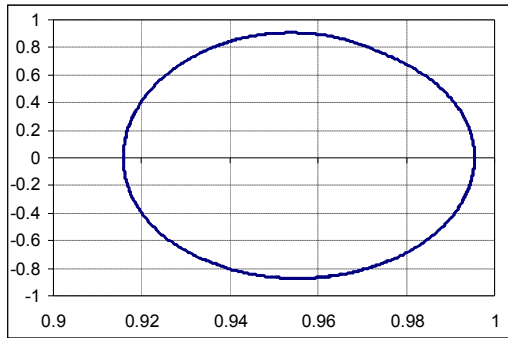


Рис. 24. Фазовая диаграмма (w_1, \dot{w}_1)

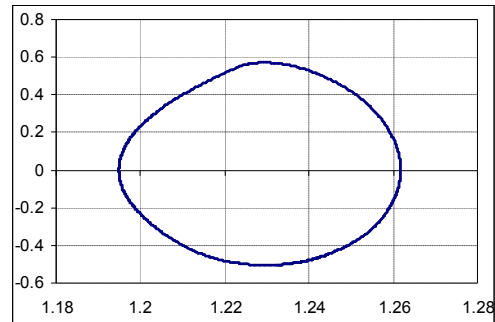


Рис. 25. Фазовая диаграмма (w_2, \dot{w}_2)

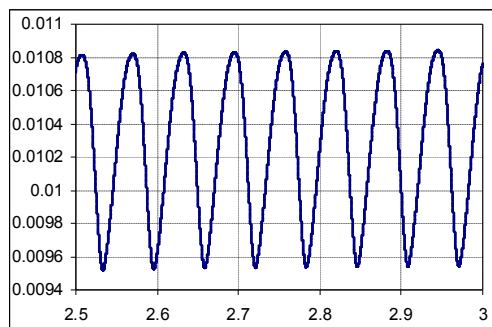


Рис. 26. Разность распределений $w_1 - w_2$

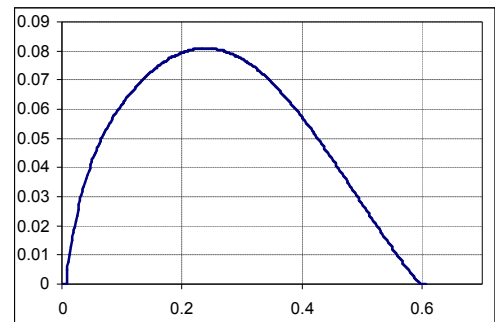


Рис. 27. Характер распределения компоненты силы ударного взаимодействия, пропорциональной произведению скорости и перемещения

Общий анализ влияния компонент силы ударного взаимодействия.

Анализируя приведенные диаграммы, можно заключить, что каждая из составляющих вносит свой особый вклад в поведение виброударной системы, и путем совмещения несколько компонент силы ударного взаимодействия можно получить большое число комбинаций численных характеристик и качественного характера поведения системы.

Реальное поведение конкретной технической виброударной системы можно определить, используя комбинацию различных компонент силы ударного взаимодействия в системе. Комбинируя при этом весовыми коэффициентами отдельных составляющих, можно достичь совпадения результатов численного моделирования поведения виброударной системы с экспериментальными данными [1].

В то же время, отвлекаясь от исследования конкретных виброударных систем, можно исследовать реакцию модели виброударной системы на те или иные характеристики комбинацией рассмотренных выше компонент силы ударного взаимодействия.

Для этого рассмотрим несколько характерных комбинаций I-IV, причем по мере усложнения математической модели будет добавляться в систему та или иная составляющая силы взаимодействия элементов виброударной системы. При этом название того или иного варианта модели для определения данной компоненты силы соответствует характеру зависимости от скорости и перемещения.

Линейная вязкоупругая неударживающая компоненты силы. В этом случае внутренняя сила записывается следующим образом:

$$F = -C_3^1 \cdot \zeta - H_3^1 \cdot \dot{\zeta} \cdot S(\dot{\zeta}), C_3^1 = const, \tag{9}$$

$$H_3^1 = H_3 \cdot S(\dot{\zeta}); S(\dot{\zeta}) = 0, \dot{\zeta} \geq 0; 1, \dot{\zeta} < 0.$$

На рисунках (рис. 28 - 33) проілюстрован характер поведения системы при такой модели силы.

Из сравнения картин поведения упругой и вязкоупругой систем видно, что при добавлении в систему соизмеримого по величине линейного демпфирования она выходит на установившийся равноударный режим. Также в системе изменился характер фазовых диаграмм, и фазовая траектория приобрела замкнутый характер в пределах одного периода колебаний, т.е. субгармонический режим не реализуется.

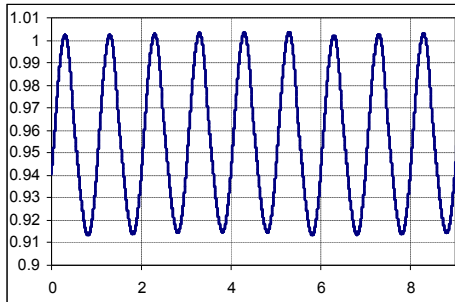


Рис. 28. Распределение $w_1(t)$

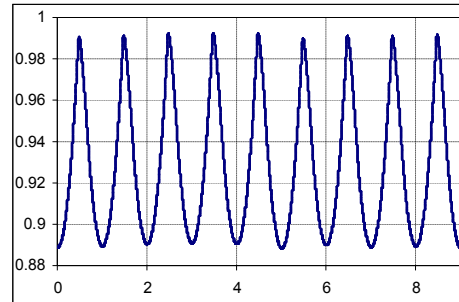


Рис. 29. Распределение $w_2(t)$

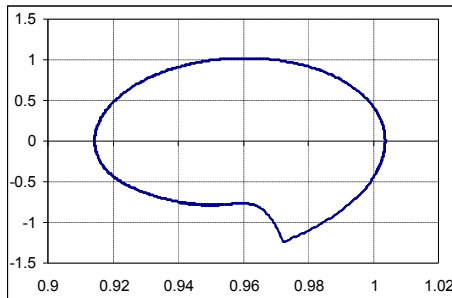


Рис. 30. Фазовая диаграмма (w_1, \dot{w}_1)

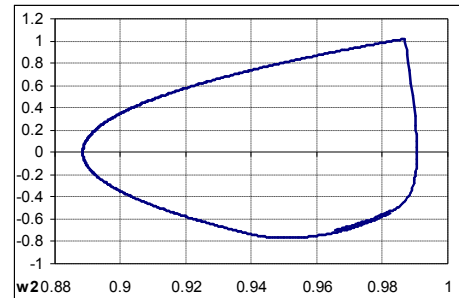


Рис. 31. Фазовая диаграмма (w_2, \dot{w}_2)

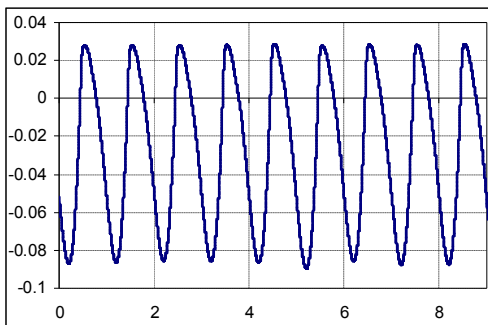


Рис.32. Разность распределений $w_1 - w_2$

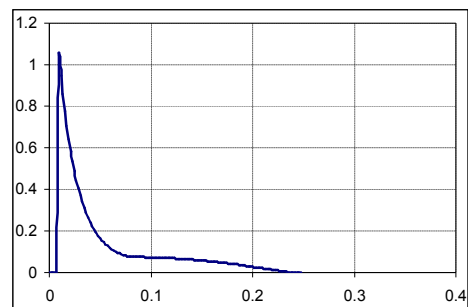


Рис. 33. Характер распределения относительной линейной вязкоупругой неударивающей компоненты силы

Нелинейная упругая и линейная вязкая компоненты силы. В этом случае сила ударного взаимодействия записывается следующим образом:

$$F = -C_3^1 \cdot \zeta - C_3^1 \cdot \zeta \times |\zeta| / \max|\zeta| - H_3^1 \cdot \dot{\zeta} \cdot S(\dot{\zeta}). \quad (10)$$

В случае добавления в систему нелинейной упругой компоненты поведение системы будет следующим (рис. 34 - 39). Наблюдается равноударный установившийся режим движения, практически повторяющий предыдущий вариант.

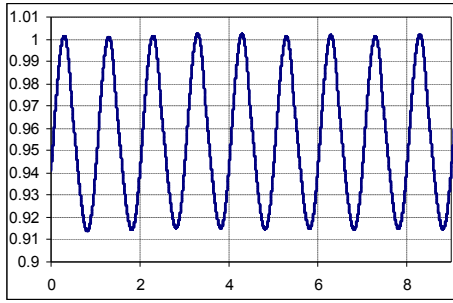


Рис. 34. Распределение $w_1(t)$

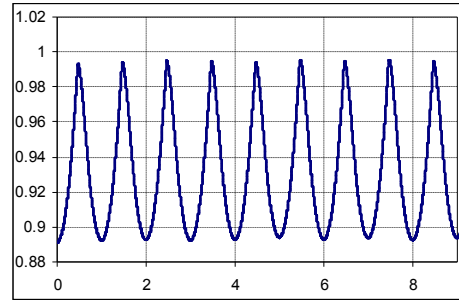


Рис.35. Распределение $w_2(t)$

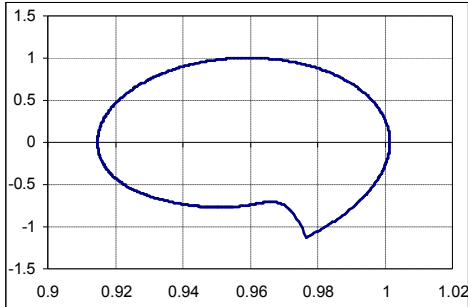


Рис. 36. Фазовая диаграмма (w_1, \dot{w}_1)

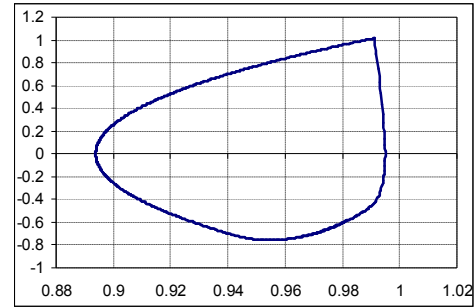


Рис. 37. Фазовая диаграмма (w_2, \dot{w}_2)

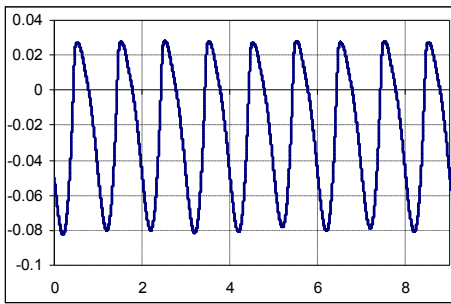


Рис. 38. Разность распределений $w_1 - w_2$

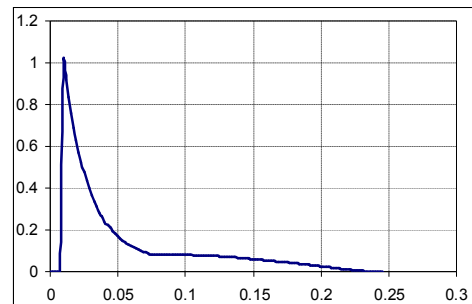


Рис. 39. Характер распределения нелинейной упругой и линейной вязкой компонент силы

Модель с набором всех компонент силы (и четырех слагаемых частичной суммы ряда Тейлора). В этом случае сила взаимодействия записывается следующим образом:

$$F = -C_3^1 \cdot \zeta - C_3^1 \cdot \zeta \times |\zeta| / \max|\zeta| - H_3^1 \cdot \dot{\zeta} \cdot S(\dot{\zeta}) - H_3^1 \cdot \dot{\zeta} \times |\zeta| / \max|\zeta| \cdot S(\dot{\zeta}). \quad (11)$$

Это – самый общий из рассмотренных случаев – модель с линейными и нелинейными по скорости и перемещению компонентами. Характерные графики распределений контролируемых величин приведены ниже (рис. 40 - 45).

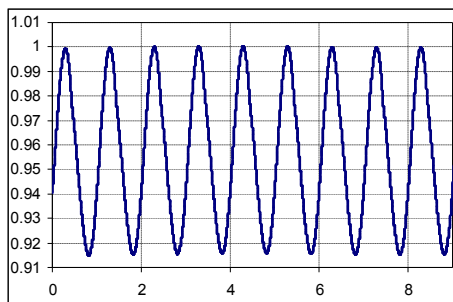


Рис. 40. Распределение $w_1(t)$

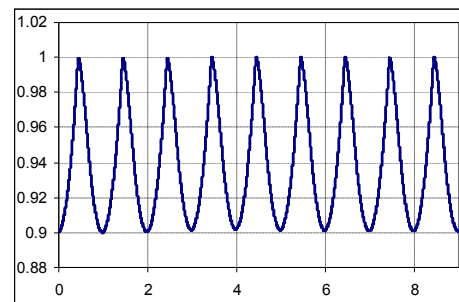


Рис. 41. Распределение $w_2(t)$

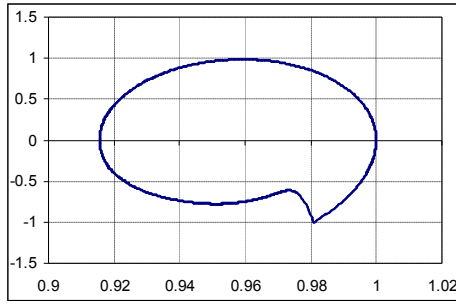


Рис. 42. Фазовая диаграмма (w_1, \dot{w}_1)

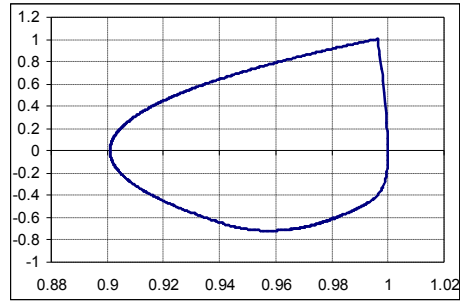


Рис. 43. Фазовая диаграмма (w_2, \dot{w}_2)

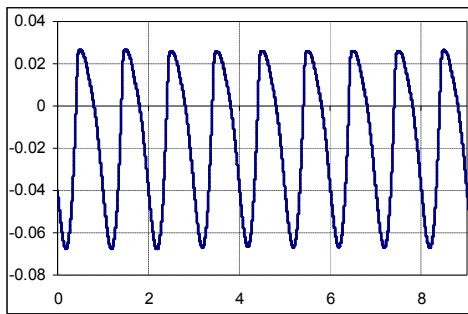


Рис. 44. Разность распределений $w_1 - w_2$

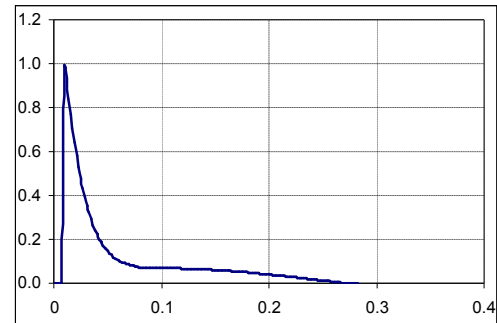


Рис. 45. Характер распределения относительной силы, модель которой содержит все 4 компоненты силы

Стоит еще раз отметить, что приведенная модель была выбрана как базовая. Она содержит четыре компоненты. При этом характер установившегося процесса в данном случае соответствует случаю, когда в представлении силы ударного взаимодействия присутствует только два линейных члена (от скорости и от перемещения).

Таким образом, при введении нелинейных слагаемых такие характеристики исследованной системы как амплитуда силы, длительность импульса и перемещений меняются незначительно (относительно модели с линейными компонентами), однако появляются дополнительные возможности варьирования для получения более точного решения и подбора параметров при расчетно-экспериментальном определении силы ударного взаимодействия.

Как показал анализ публикаций, некоторые авторы предлагают аппроксимировать силу ударного взаимодействия в момент удара по модифицированной формуле Герца [5, 6]. Покажем, что предложенный в данной работе подход также позволяет выбрать внутреннюю силу по формуле Герца, предложенной в упомянутых работах. Для этого представим силу в виде:

$$F = -\beta(w_2 - w_1)^{3/2} = -\beta\zeta\sqrt{|\zeta|}, \quad \zeta \leq 0. \quad (12)$$

Здесь $\beta = 3.35 \cdot 10^9$. В результате интегрирования системы дифференциальных уравнений с выражением для силы (12) получаются следующие результаты, представленные на рис. 46, 47.

Стоит отметить, что эти же характеристики в системе можно получить путем выбора внутреннего усилия следующим образом и подбора соответствующих весовых коэффициентов:

$$F = \alpha_{11}(w_2 - w_1) + \alpha_{12}(w_2 - w_1)^2 = -\alpha_{11}\zeta + \alpha_{12}\zeta^2. \quad (13)$$

Здесь $\alpha_{11} = 9.3 \cdot 10^7$ Н/м, $\alpha_{12} = 7.15 \cdot 10^5$ Н с/м.

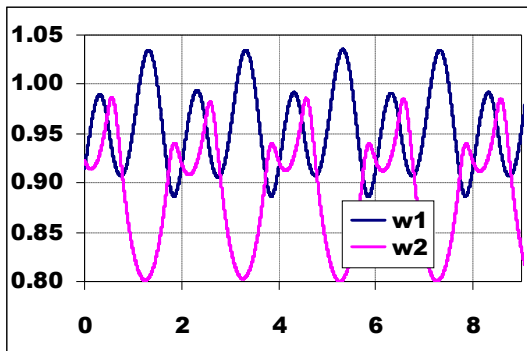


Рис. 46. Распределение относительной величины $w_1(t)$ и $w_2(t)$ в относительном времени на установившемся режиме

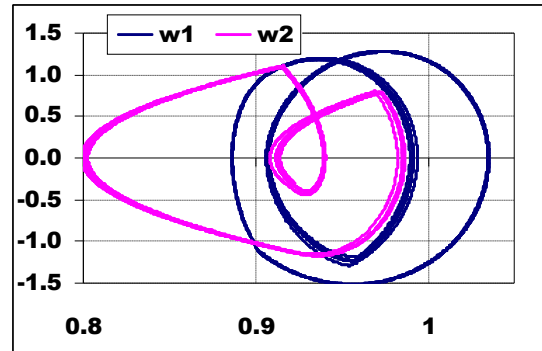


Рис. 47. Фазовые диаграммы в плоскостях $(w_1(t), \dot{w}_1(t))$ и $(w_2(t), \dot{w}_2(t))$ (относительные величины)

Ниже представлены графики распределения внутренней силы ударного взаимодействия на установившемся режиме в относительном времени (рис. 48) при аппроксимации внутренней силы различными функциями: по Герцу (12) и по квадратичной зависимости (13).

Как видно из графика, при аппроксимации (13) отличие решения по максимальному значению составляет менее 10% от случая задания силы по модифицированной формуле Герца.

По остальным характеристикам динамическое поведение системы практически совпадает (погрешность – в пределах 5%) (рис. 49, 50 в сравнении с рис. 46, 47). Таким образом, совпадает также и характер установившегося динамического процесса, который является субгармоническим.

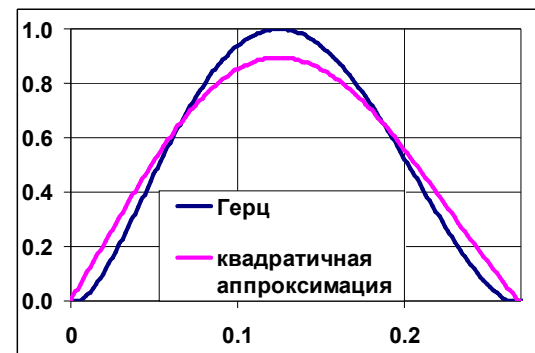


Рис. 48. Распределение относительной силы ударного взаимодействия $F(t)$ во времени на установившемся режиме

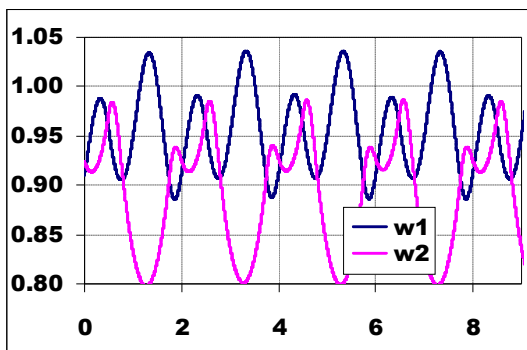


Рис. 49. Распределение относительной величины $w_1(t)$ и $w_2(t)$ в относительном времени на установившемся режиме

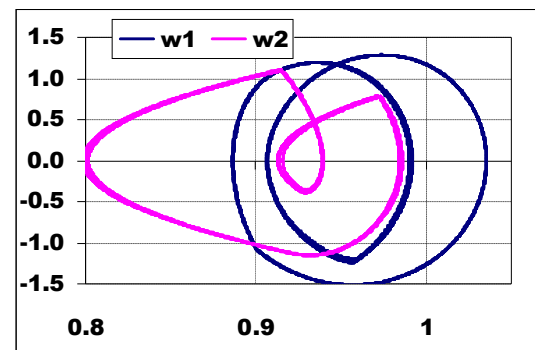


Рис. 50. Фазовые диаграммы в плоскостях $(w_1(t), \dot{w}_1(t))$ и $(w_2(t), \dot{w}_2(t))$ (относительные величины)

Таким образом, для удовлетворения данным экспериментальных исследований можно привлекать различные модели. Варьируя базисные функции в разложении силы ударного взаимодействия по фазовым переменным, а также количество удерживаемых членов ряда в таком разложении, можно в широких пределах изменять основные характеристики, получаемые при численном интегрировании уравнений движения системы. При этом важно определить то минимально необходимое количество членов ряда, которые следует удержать для достижения требуемого уровня соответствия результатов численных и экспериментальных исследований. Также важно определить «парциальный» вклад отдельных членов построенного ряда в динамику исследуемой виброударной системы, что сделано и описано выше в материалах данной работы.

Анализ результатов. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. В исследуемой системе при нулевых начальных условиях возбуждается устойчивый установившийся режим кратности 1 или кратности 2.

2. Длительность τ ударного взаимодействия зависит от параметров, характеризующих инерционно-геометрические параметры взаимодействующих тел, упругие, демпфирующие свойства материалов этих тел или промежуточного слоя, находящегося в зоне взаимодействия данных тел.

3. Максимальные значения различных компонент силы ударного взаимодействия, соответствующих различным членам ряда в разложении этой силы по фазовым переменным, достигаются на различных фазах взаимодействия: на начальном этапе – компоненты, пропорциональные скорости; в средней – компоненты, пропорциональные перемещениям.

4. При определенных сочетаниях компонент силы ударного взаимодействия возможны как «равноударные» периодические процессы с периодом ударного процесса T , так и «разноударные» - с периодом $2T$ (субгармонические). При этом меньшая и большая по амплитуде силы чередуются, причем соотношения этих амплитуд зависит от соотношений коэффициентов различных членов ряда в разложении силы ударного взаимодействия по выбранным базисным функциям от фазовых переменных – относительной скорости и взаимного сближения (взаимопроникновения) тел.

5. Путем соответствующего подбора коэффициентов в разложении силы контактного взаимодействия можно аппроксимировать различные модели для ее описания, например, модель Герца [5, 6].

Т.о., подтверждается варьированность и реагирование системы на изменение структуры и параметров в зависимости, описывающей усилие контактного взаимодействия в исследуемой виброударной системе как функцию от переменных состояния. Это дает основание утверждать, что решение обратной задачи (т.е. определение вида зависимости $F = F(\zeta, \dot{\zeta})$) имеет решение, причем при достаточно небольшом наборе базисных функций в разложении (4).

В качестве общего вывода можно заключить, что путем целенаправленного перебора компонент силы F в разложении (4) можно достаточно широко управлять и характером движения, и амплитудами сил, и временем контакта тел в виброударной системе, и временными распределениями сил ударного взаимодействия. Т.о., предложенный в работе подход продемонстрировал возможность управления свойствами системы путем изменения структуры и параметров различных составляющих силы внутреннего взаимодействия в виброударной системе, а также потенциальную возможность решения обратной задачи – идентификации характеристик той или иной конкретной виброударной системы по результатам эксперимента.

Заключення. В статті пропонується новий підхід до дослідження динамічних характеристик віброударних систем, якому притаманні наступні особливості.

1. Використовується розроблений раніше новий підхід до визначення сили ударного взаємодіяння в віброударній системі, при якому залежність цієї сили від параметрів стану системи не задається, а визначається в ході розрахунково-експериментальних досліджень.

2. Пропонується представлення системи в вигляді функціонального, в частині, степенного ряду по зближенням і відносним швидкостям елементів віброударної системи, т.е. по їх швидкостям і переміщенням. В цьому випадку характер динамічних процесів в системі визначають кількість утримуваних членів ряду в розкладі і величини відповідних коефіцієнтів при цих членах.

3. Пропонуваний підхід дозволяє врахувати суттєво нелінійні процеси в віброударній системі, які дають можливість краще описати динаміку високонавантажених віброударних машин, в першу чергу сили ударного взаємодіяння, які априорі невідомим чином залежать від змінних стану для реальних випадків, коли процеси, що відбуваються в результаті ударного взаємодіяння технологічного вантажу і корпусу машини, можуть призводити до утворення шару речовини з складними і важко визначуваними фізико-механічними властивостями.

По результатам проведених досліджень можна зробити наступні **висновки**.

1. Проаналізовано характер впливу кожного з складових компонентів в представленні сили ударного взаємодіяння в вигляді частинної сумми ряду Тейлора по величинам зближення і відносним швидкостям двох взаємодіючих тіл, що утворюють віброударну систему. Встановлено, що різні компоненти призводять до відрізняються кількісно і якісно динамічним установившимся процесам при численному інтегруванні рівнянь руху. Особливий інтерес представляє тимчасове розподілення сили ударного взаємодіяння, яка при варіюванні коефіцієнтів ряду змінює характер, в т.ч. – тривалість ударного взаємодіяння, величину максимального значення і момент його досягнення. Також виведено декілька варіантів якісного аналізу з різними їх комбінаціями.

2. Проаналізовано характер руху елементів системи по фазовим портретам. В досліджуваних віброударних системах виявлені стійкі «рівноударні» (з періодом T дії збурюючої сили) і «різноударні» (з подвійним періодом $2T$ – субгармонічні) установившіся режими. При цьому шляхом варіювання структурою сили ударного взаємодіяння (т.е. складу і кількості базисних функцій в її представленні в вигляді частинної сумми функціонального ряду, наприклад, ряду Тейлора) і величинами коефіцієнтів цього ряду можна переходити від «рівноударних» до «різноударним» режимам (і навпаки).

3. Від структури і параметрів в представленні сили ударного взаємодіяння в вигляді частинної сумми ряду від змінних стану (від відносного зближення і швидкості зіштовбуваних тіл) дуже сильно залежать: тривалість удару (може змінюватися на порядок); фазові траєкторії (від майже недеформованого еліпса до неправильної каплеподібної форми з різкими зламками); амплітуда ударної сили (змінюється в декілька разів); положення максимуму цієї сили (в початку інтервалу ударного взаємодіяння або ближче до середини). Суттєве змінення якісного характеру динамічних процесів, а також їх кількісних характеристик, дає підставу для висновків, во-перше, про управляємість процесів в віброударних системах, а, во-друге, – про можливість рішення задачі ідентифікації сили ударного взаємодіяння навіть при порівняно невеликій кількості членів ряду в розкладі по фазовим змінним.

В дальнейшем планируется провести более подробный анализ зависимости количественных характеристик виброударных процессов от отдельных параметров, которые отражают физико-механические свойства элементов той или иной виброударной системы.

Литература: 1. Ткачук Н.А., Грабовський А.В., Ткачук Н.Н., Костенко Ю.В., Артемов И.В. Численное моделирование динамических процессов в виброударных системах // «Вісник НТУ «ХПИ». Тем. випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 42, 2011. – С.179-187. 2. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. – М.: Машиностроение. – 1981. – Т. 2. Вибрационные процессы и машины. – Под ред. Блехмана И. И., 1979. – 351 с. 3. Барчан Е.Н. Совершенствование методов расчета и конструкций выбивной транспортной машины для формовочной линии крупного литья: дис. канд. техн. наук: 05.02.02. – Мариуполь. – 2008. 4. Грабовский А.В. Ударное взаимодействие и динамические процессы в виброударных машинах с частичным разрушением технологического груза: дис. канд. техн. наук: 05.02.09. – Харьков. – 2011. 5. Погорелова О. С. Сравнительный анализ способов моделирования контактного взаимодействия в виброударных системах / О. С. Погорелова, Т. Г. Постникова, С. Н. Гончаренко // Пробл. Прочности. – 2009. – № 4. – С. 69-77. 6. Погорелова О. С. Численные исследования динамических процессов в виброударных системах при моделировании удара силой контактного взаимодействия / О.С. Погорелова, Т. Г. Постникова, О. А. Лукьянченко // Пробл. прочности. – 2008. – № 6. – С. 82-90.

Bibliography (transliterated): 1. Tkachuk N.A., Grabovs'kij A.V., Tkachuk N.N., Kostenko Ju.V., Artemov I.V. Chislennoe modelirovanie dinamicheskikh processov v vibroudarnykh sistemah // «Visnik NTU «HPI». Tem. vipusk: Matematichne modeljuvannja v tehnicі ta tehnologijah, № 42, 2011. – S.179-187. 2. Vibracii v tehnikе: Spravochnik. V 6-ti tomah. – M.: Mashinostroenie. – 1981. – T. 2. Vibracionnye processy i mashiny. – Pod red. Blehmana I. I., 1979. – 351 s. 3. Barchan E.N. Sovershenstvovanie metodov rascheta i konstrukcij vybivnoj transportnoj mashiny dlja formovochnoj linii krupnogo lit'ja: dis. kand. tehn. nauk: 05.02.02. – Mariupol'. – 2008. 4. Grabovskij A.V. Udarное vzaimodejstvie i dinamicheskie processy v vibroudarnykh mashinah s chastichnym razrusheniem tehnologicheskogo gruzа: dis. kand. tehn. nauk: 05.02.09. – Har'kov. – 2011. 5. Pogorelova O. S. Sravnitel'nyj analiz sposobov modelirovanija kontaktnogo vzaimodejstvija v vibroudarnykh sistemah / O. S. Pogorelova, T. G. Postnikova, S. N. Goncharenko // Probl. Prochnosti. – 2009. – № 4. – S. 69-77. 6. Pogorelova O. S. Chislennye issledovanija dinamicheskikh processov v vibroudarnykh sistemah pri modelirovanii udara siloj kontaktnogo vzaimodejstvija / O.S. Pogorelova, T. G. Postnikova, O. A. Luk'janchenko // Probl. prochnosti. – 2008. – № 6. – S. 82-90.

Костенко Ю.В., Ткачук М.А., Грабовський А.В., Ткачук М.М.

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ НА ХАРАКТЕР ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІБРОУДАРНИХ СИСТЕМАХ

У статті розглядається задача про вплив функції, яка описує силу ударної взаємодії, на характер динамічних процесів у виброударних системах. Установлені характерні особливості: деформації фазових діаграм, можливість субгармонічного режиму, зміна тривалості ударної взаємодії. Наведені приклади дослідження реальних виброударних систем.

Костенко Ю.В., Ткачук Н.А., Грабовский А.В., Ткачук Н.Н.

ЧИСЛЕННИЙ АНАЛІЗ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ХАРАКТЕР ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИБРОУДАРНЫХ СИСТЕМАХ

В статье рассматривается задача о влиянии функции, которая описывает силу ударного взаимодействия, на характер динамических процессов в виброударных системах. Определены характерные особенности: деформации фазовых диаграмм, возможность субгармонического режима, смена длительности ударного взаимодействия. Приведены примеры исследования реальных виброударных систем.

Kostenko Y.V., Tkachyk M.A., Grabovsky A.V., Tkachyk M.M.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE MODEL INFLUENCE FOR THE IMPACT
INTERACTION FORCE DEFINITION OF THE DYNAMICAL PROCESSES
CHARACTER IN VIBROIMPACT SYSTEMS

This paper describes the task about influence of the function, that describes impact interaction force, on the character of the dynamical processes in the vibroimpact systems. Phase diagram deformation, sybharmonic mode possibility, changing of the impact interaction duration were defined as outstanding characteristics. The examples of real vibroimpact systems investigations were presented.

УДК 621.7

Львов Г.И., д-р техн. наук; Огороков В.А.

ОПТИМАЛЬНОЕ АВТОФРЕТИРОВАНИЕ ТАНКОВОЙ ПУШКИ

Введение. Постоянное улучшение защищенности танков и противотанковых средств, а также возрастание огневой мощи танков непременно влечет за собой повышение прочностных характеристик отдельных частей вооружения танка. Для придания снаряду большей начальной скорости при выстреле необходимо увеличивать давление от взрыва пороховых газов в канале ствола. Однако величина предельного давления ограничена прочностью материала пушки. Одним из способов повышения предельно допустимого давления является процедура автофретирования. Для этого ствол нагружают так, чтобы во внутренних слоях или по всей толщине возникли пластические деформации. После снятия нагрузки во внутренних стенках ствола появляются остаточные сжимающие напряжения, которые суммируются с противоположными по знаку напряжениями от внутреннего давления, и в результате дают меньшее значение действующих напряжений. Таким образом, значительно повышается допустимое внутреннее давление. Автофретирование является альтернативой использования составных цилиндров, собранных с предварительным натягом.

Фундаментальными работами в области исследования автофретирования являются работы [1,2].

При разгрузке цилиндра может возникать такое явление как эффект Баушингера, который для одноосного напряженного состояния проявляется в снижении предела текучести на сжатие, предварительно пластически растянутого образца. В случае сложного напряженного состояния это может проявиться в появлении вторичных пластических деформаций при разгрузке, и как следствие ведет к уменьшению благоприятных остаточных напряжений. Поэтому при расчете процессов автофретирования необходимо использовать теории пластичности, позволяющие учесть эффект Баушингера. В статье рассматривается модель пластичности с комбинированным упрочнением. При использовании такой модели поверхность пластичности может равномерно расширяться и смещаться, что позволяет учесть эффект Баушингера. Вопрос о влиянии эффекта Баушингера на процесс автофретирования рассматривается в статьях [3,4].

Процедура автофретирования приводит к образованию значительных пластических деформаций, что может привести к разупрочнению материала вследствие появления в нем повреждений. На экспериментальных диаграммах деформирования это проявляется в снижении модуля упругости материала при разгрузке. Для моделирования таких явлений используется континуальная механика повреждаемости. Впервые в работах Работнова Ю.Н. [5] предложено связать повреждения материала и деградацию