

ния в элементах металлоконструкции, превышающие предел выносливости материалов этих элементов; возникновение трещин в подрешетных балках и опорных дебалансных валов в процессе эксплуатации ВТМ.

Возникающие проблемы, как показывает анализ, не могут быть решены в рамках традиционных методик и моделей, и требуется разработка новых методов решения получаемой актуальной и важной задачи совершенствования конструкций выбивных транспортирующих машин для крупногабаритных отливок по критериям производительности, работоспособности, долговечности и прочности.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований виброударной машины, которые являются основой для последующего уточнения величины нагрузок, действующих на машину. Они будут рассчитаны на основе комплекса расчетно-экспериментальных исследований, что составляет направление дальнейших разработок.

Список литературы: 1. Барчан С.М. Удосконалення методів розрахунку та конструкції вибивної транспортуючої машини для формувальних ліній крупного литва : дис. канд. техн. наук : 05.02.02 / Барчан Євген Миколайович. – Маріуполь. – 2008. – 178 с. 2. Грабовский А.В. Ударное взаимодействие и динамические процессы в виброударных машинах с частичным разрушением технологического груза: дис. кандидата техн. наук: 05.02.09 / Грабовский Андрей Владимирович. – Харків, 2010. – 181 с. 3. Ткачук Н.А. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глушенко, А.В. Ткачук // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – № 2, т. 2. – С.85-96. 4. Ткачук Н.А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – №1. – С. 57-79.

Поступила в редколлегию 16.10.2012

УДК 539.3

Ю.В. КОСТЕНКО, асп. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ“;

А.В. ТКАЧУК, к.т.н., ст. науч. сотр., ст. науч. сотр. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ“;

А.В. ГРАБОВСКИЙ, к.т.н., науч. сотр. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ“;

Н.Н. ТКАЧУК, к.т.н., мл. науч. сотр. каф. КГМ им. А.А.Морозова, НТУ „ХПИ“

ИЗМЕНЕНИЕ МАССЫ ОДНОГО ИЗ КОМПОНЕНТОВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕР ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИБРОУДАРНЫХ СИСТЕМАХ: МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

У цієї статті розглядається задача про вплив змінної маси одного з компонентів виброударної системи на характер динамічних процесів, що в ній протікають.

Ключові слова: виброударна система, динамічний процес, змінна маса, числове інтегрування, усталений процес, ударний резонанс.

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

В данной статье рассматривается задача о влиянии переменной массы одного из компонентов виброударной системы на характер протекающих динамических процессов.

Ключевые слова: виброударная система, динамический процесс, переменная масса, числовое интегрирование, установившийся процесс, ударный резонанс.

This paper describes the task about influence of the variable mass in system components, on the character of the occurring dynamical processes.

Keywords: vibroshock system, dynamic process, changing mass, numerical integrating, established processes, shock resonance.

Введение. Виброударные машины имеют широкое применение в современной технике. Как правило, для анализа их динамики в наиболее простом случае используется интегрирование системы дифференциальных уравнений движения двухмассовой системы, связанной усилием ударного взаимодействия. Для определения же контактной силы ударного взаимодействия принято представлять ее в виде зависимости от относительной скорости и величины взаимного сближения (внедрения друг в друга) двух взаимодействующих тел. Эти модельные зависимости [1-6] имеют различный характер, который обусловлен геометрией и свойствами материала тел в каждом конкретном случае. Что является характерным для всех этих случаев, так это то, что параметры системы, такие как массы, жесткости, вязкости являются неизменными, что позволяет осуществить поиск значений интересующих параметров лишь для какого-то определенного момента времени. Более того, если спроецировать такую виброударную систему на реальность, то становится очевидным, что неизменность ряда параметров является идеализацией, призванной упростить решение задачи, но в то же время влияющей отрицательным образом на достоверность получаемой реальной картины, так как при таком условии не учитывается ряд факторов, действующих в реальных виброударных системах.

Целью данной работы является разработка подходов для решения задачи, одним из условий которой является частичное разрушение груза в процессе взаимодействия с ударной машиной, моделируемое изменением массы в процессе выполнения технологической операции.

Задача о моделировании динамических процессов в виброударных системах с частичным разрушением технологического груза была поставлена в статье [7]. Для того, чтобы описать силы ударного взаимодействия в простейших виброударных системах (рис. 1) применяется численное интегрирование системы уравнений

$$\begin{cases} m_1 \ddot{w}_1 + C_1 w_1 + H_1 \dot{w}_1 + A \sin \omega t + m_1 g + F = 0; \\ m_2 \ddot{w}_2 + m_2 g - F = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где w_1 и w_2 - с точностью до направления перемещения тел 1 и 2 с массами m_1, m_2 (возможно внедрение тел друг в друга); C_1, H_1 - коэффициенты жесткости и вязкости системы поддресоривания тела 1; A, ω - амплитуда и круговая частота внешней возбуждающей гармонической силы; g - ускорение свободного падения [1].

Основная идея, предложенная в статье [7], 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:

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

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

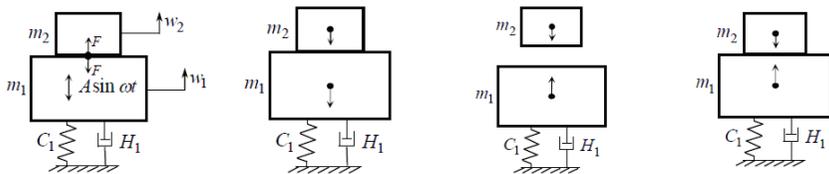


Рис. 1 – Виброударная система, состоящая из двух тел

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:

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

Для моделирования переменной массы груза предлагается рассматривать ее как функцию, зависящую от времени (например, определяемую из эксперимента):

$$m_2 = m_2(t). \quad (5)$$

Таким образом, можно задать любой характер изменения массы груза, основываясь на дополнительных теоретических либо экспериментальных данных.

Постановка задачи. Данную задачу предлагается решить на базе тестовой системы. Рассматривается виброударная система, описанная в [1], обладающая следующими значениями параметров: $m_1 = 15960 \text{ кг}$, $m_2 = 5000 \text{ кг}$, $C = 5280 \text{ кН/м}$, $H = 127680 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$, $A = 293 \text{ кН}$, $\nu = 16 \text{ Гц}$. Длительность рассматриваемого процесса составляет 30 с, которым соответствует 40000 итераций. Таким образом, для моделирования одной секунды требуется прохождение 1350 итераций. На графиках и рисунках, которые будут представлены далее, продолжительность процесса представлена именно в количестве итераций.

Для определения установившегося периодического процесса используется численное интегрирование системы уравнений (1) методом Рунге-Кутты при нулевых начальных условиях. Путем варьирования количества и типа членов в разложении функции F (4) можно исследовать влияние различных факторов на поведение виброударной системы (1).

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.

Из экспериментов известно, что в ходе цикла выбивки технологический груз теряет до 50% от своей исходной массы. Часть утраченной массы выходит из состава системы, высыпаясь сквозь решетки на пол, часть же остается в ней, оседая на машине и, таким образом, изменяя ее массу. Для первоначального приближения предлагается учитывать лишь изменение массы технологического груза, без учета изменения массы машины. Случай совместного изменения масс является объектом дальнейших исследований. Также необходимо отметить, что нередким является случай, когда одновременно на выбивной машине присутствует два технологических груза, что существенно влияет на динамические характеристики системы. Это явление предлагается моделировать увеличением массы технологического груза (второго тела) вдвое. Изменение массы технологического груза предполагается подчинить законам, которые описываются линейной и кусочно-линейной функциями.

Математическая модель. Для описания виброударной системы используется система уравнений (1). Необходимо отметить, что аналитическое решение сложно использовать при анализе движения многомассовых систем. Гораздо удобнее применять прямое численное интегрирование системы уравнений, описывающей поведение виброударной машины, при этом наблюдая переходные и установившиеся режимы ее движения. Для решения этой задачи может быть использована схема интегрирования методом Рунге-Кутты [8], которая программно реализована в пакете Maple. Тогда при ненулевых δ^* (длительности импульса) имеем непрерывную функцию $F_{\text{имп}}(t)$, и, задавая шаг интегрирования $\Delta \ll \delta^*$, можно получать численные решения, с достаточной точностью отражающие поведение динамической системы. При этом зависимость (5) является отображением того или иного характера протекания технологического процесса. В этом случае временное распределение $m_2(t)$ зависит от условий протекания процесса и свойств материала технологического груза. Например, при выбивке крупного вагонного литья [1-6] изменение массы выбиваемого кома происходит тем интенсивнее, чем выше скорости и ускорения груза, чем ниже механические свойства земляной смеси (зависят, в свою очередь, от состава смеси, клеящего вещества, температуры спекания и т.д.). Данная зависимость может быть определена либо из эксперимента, либо из аналитического или

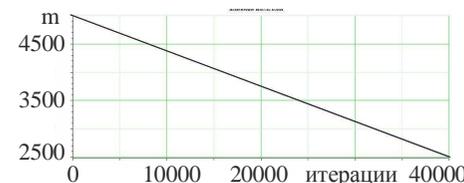


Рис. 2 – Линейный закон изменения массы кома

числового моделирования. Последние предполагают наличие модельной связи, например:

$$m_2 = f(\dot{\zeta}, \ddot{\zeta}, p). \quad (6)$$

где p – упомянутые выше свойства материала земляного кома и условия его обработки (параметры).

Установление вида зависимости (6) является предметом дальнейших исследований, и на данном этапе в качестве пробных были рассмотрены несколько произвольно заданных зависимостей. В частности, эти зависимости представлены на рис. 2, 3. Первая соответствует линейному закону изменения массы кома, вторая – кусочно-линейному.

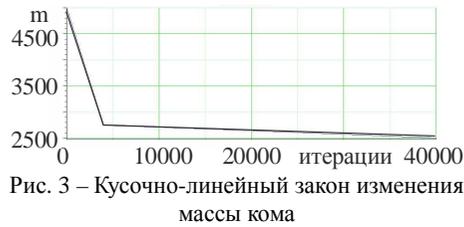


Рис. 3 – Кусочно-линейный закон изменения массы кома

Результаты расчетов. 1. *Изменение массы технологического груза по линейному закону.* Для начала рассмотрим один из простейших случаев, когда функция, описывающая изменение массы второго тела, является линейной (см. рис. 2). Интегрирование проводится при начальных условиях, когда скорости и перемещения обоих тел в начальный момент времени равны нулю.

На рис. 4-14 представлен характер динамических процессов в двухмассовой системе при $m_2 \in \{5000; 2500\}$. На рис. 7-13 данные представлены на меньшем временном интервале (500 итераций), при этом рассматривается конечная часть всего процесса, т.е. примерно последние 0,37 с.

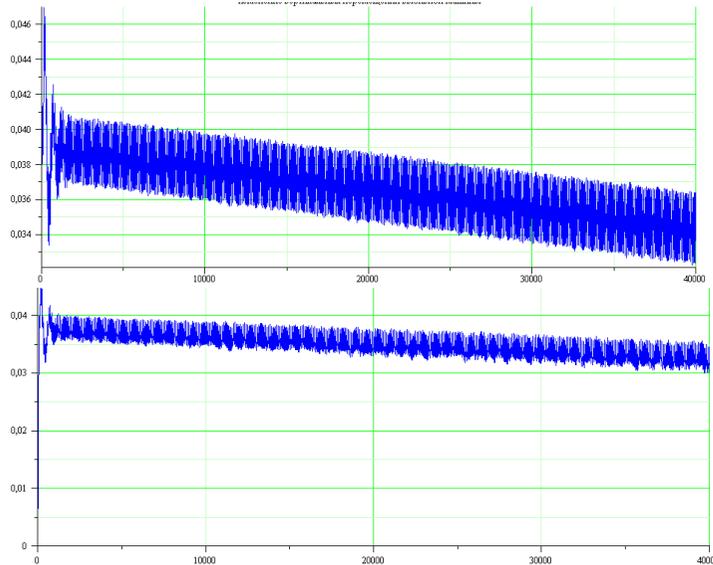


Рис. 4 – Изменения вертикальных перемещений выбивной машины

Рис. 5 – Изменения вертикальных перемещений кома

Для второго расчетного случая начальные условия для интегрирования остаются прежними, за исключением увеличения массы второго тела, которая теперь изменяется в интервале $m_2 \in \{10000; 5000\}$ кг. На рис. 15-22 представлен характер динамических процессов в двухмассовой системе при

$m_2 \in \{10000; 5000\}$. Временные интервалы, отображенные на рис. 17-21, соответствуют последним 0,37с рассматриваемого процесса.

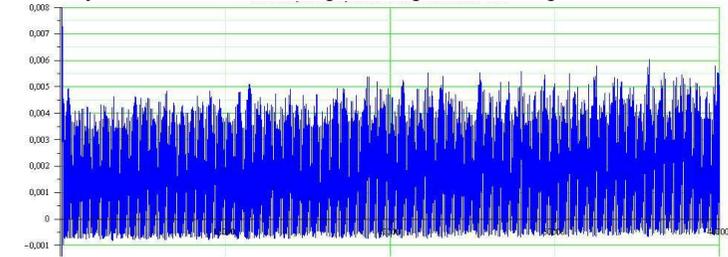


Рис. 6 – Изменения разности перемещений кома и выбивной машины

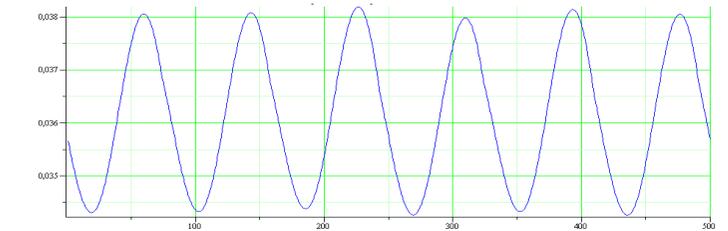


Рис. 7 – Изменения вертикальных перемещений выбивной машины

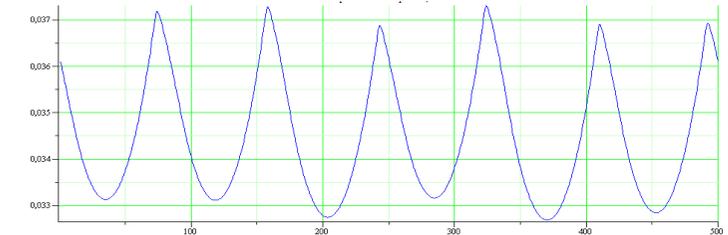


Рис. 8 – Изменения вертикальных перемещений кома

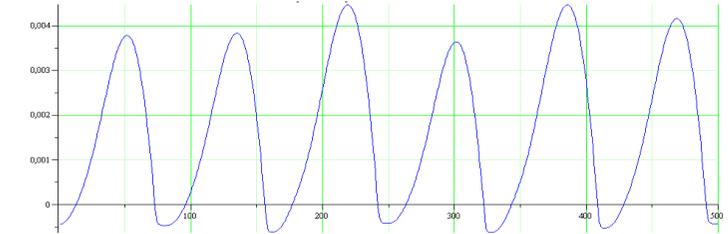


Рис. 9 – Изменения разности перемещений кома и выбивной машины

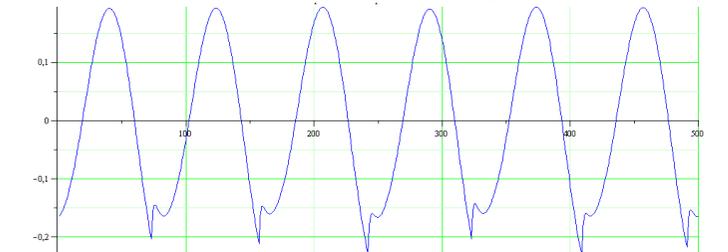


Рис. 10 – Изменения вертикальной скорости выбивной машины

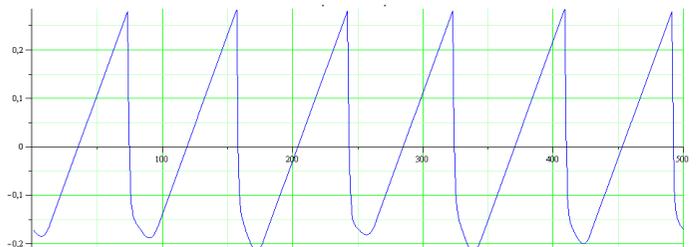


Рис. 11 –
Изменение вер-
тикальной ско-
рости кома

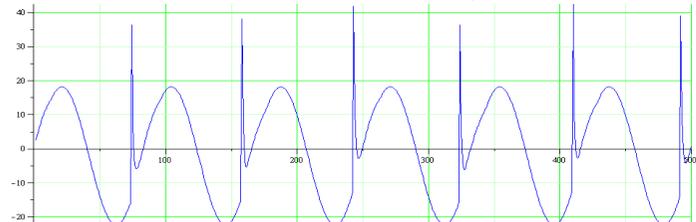


Рис. 12 –
Изменение вер-
тикального ус-
корения выв-
ивной маши-
ны

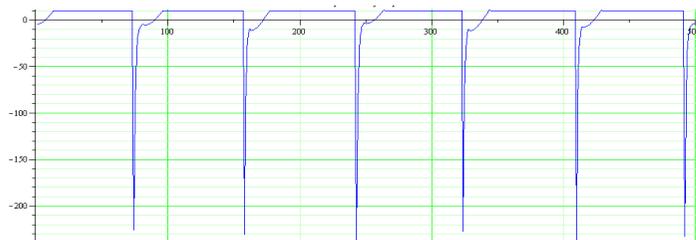


Рис. 13 –
Изменение вер-
тикального ус-
корения кома

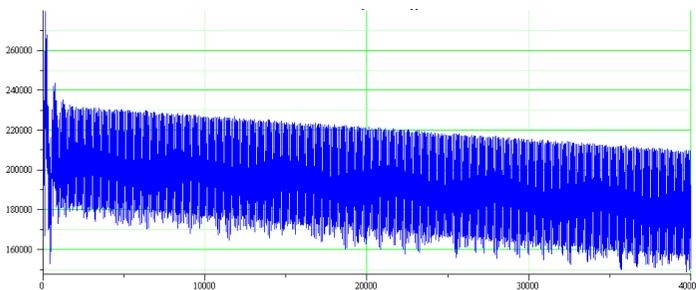


Рис.14 –
Изменение вы-
силы, действу-
ющей на пружи-
ны

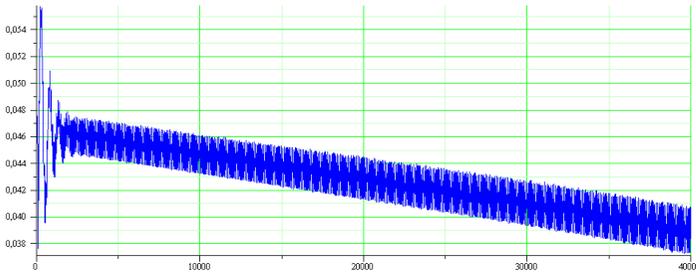


Рис 15 – Изме-
нение верти-
кальных пере-
мещений вы-
ивной маши-
ны

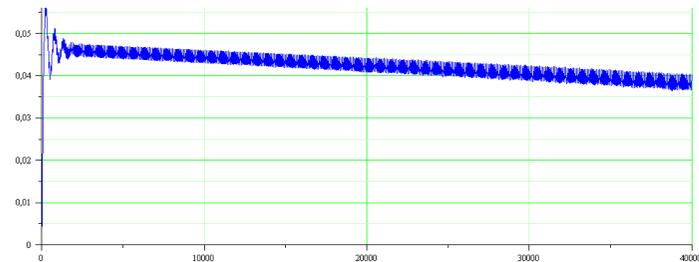


Рис. 16 – Изме-
нение верти-
кальных пере-
мещений кома

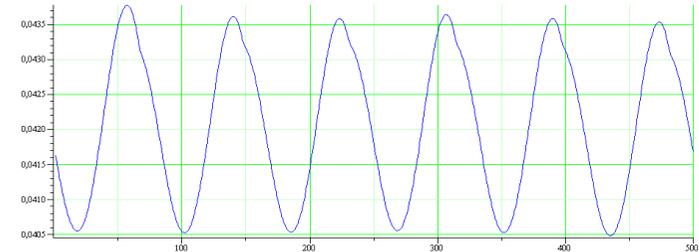


Рис. 17 – Изме-
нение верти-
кальных пере-
мещений вы-
ивной маши-
ны

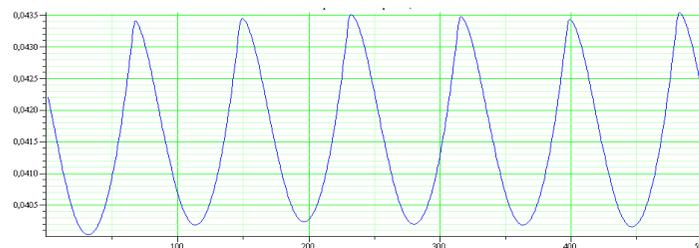


Рис. 18 –
Изменение
вертикальных
перемещений
кома

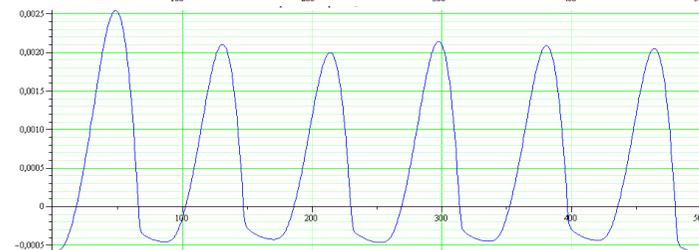


Рис. 19 – Изме-
нение разности
перемещений
кома и выв-
ивной маши-
ны

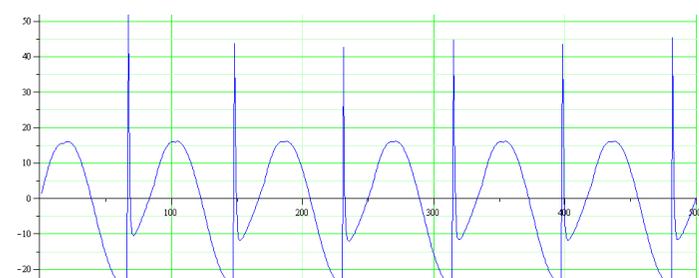


Рис. 20 – Изме-
нение верти-
кальных ус-
корений выв-
ивной маши-
ны

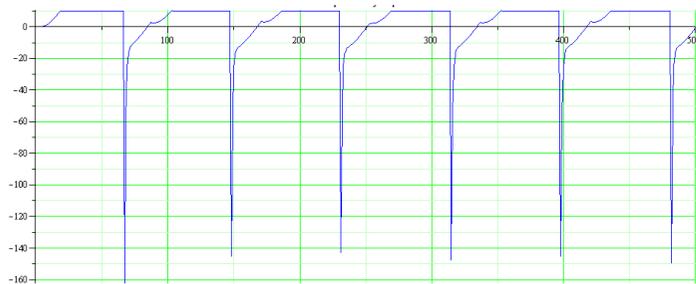


Рис. 21 – Изменение вертикальных ускорений выбивной машины

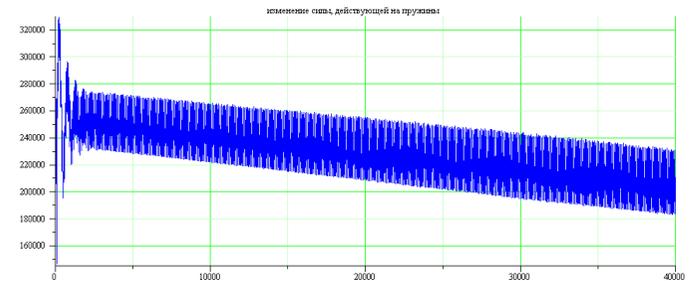


Рис. 22 – Изменение силы, действующей на пружину

2. Изменение массы второго тела по кусочно-линейному закону. Теперь перейдем к более сложному случаю, когда функция, описывающая изменение массы второго тела, является кусочно-линейной (см. рис. 3). Интегрирование проводится при тех же начальных условиях, что и в предыдущих случаях. На рис. 23-30 представлен характер динамических процессов в двухмассовой системе при $m_2 \in \{5000; 2500\}$ кг. Результаты для сокращенного временного интервала ($\approx 0,37$ с) представлены на рис. 25-29.

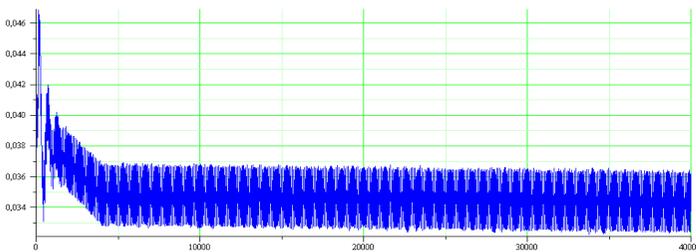


Рис. 23 – Изменение вертикальных перемещений выбивной машины

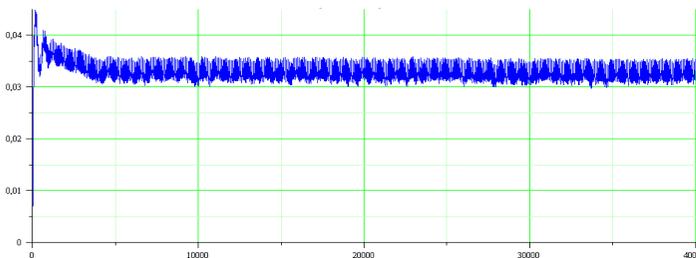


Рис. 24 – Изменение вертикальных перемещений кома

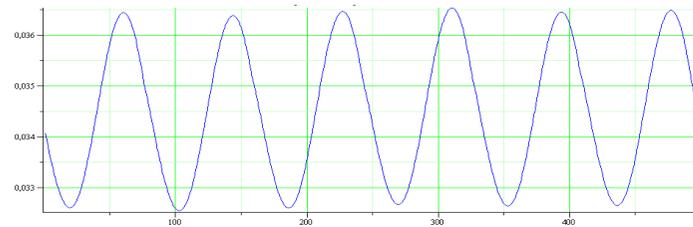


Рис. 25 – Изменение вертикальных перемещений выбивной машины

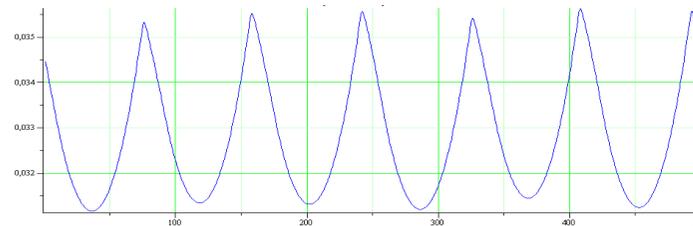


Рис. 26 – Изменение вертикальных перемещений кома

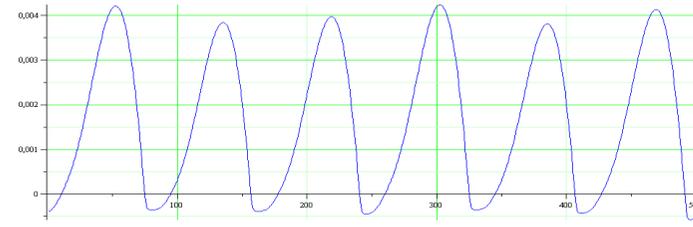


Рис. 27. Изменение разности перемещений кома и выбивной машины

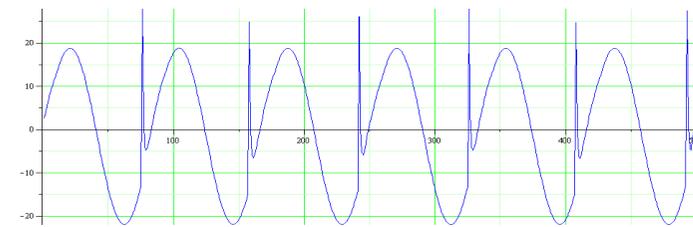


Рис. 28 – Изменение вертикальных ускорений выбивной машины

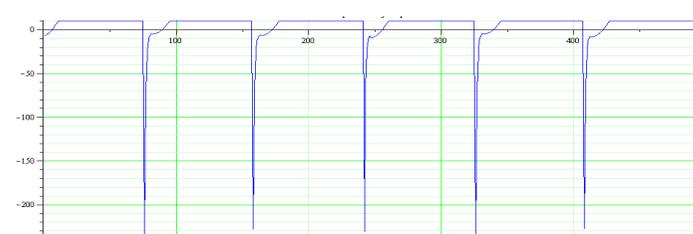


Рис. 29 – Изменение вертикальных ускорений выбивной машины

Результаты для расчетного случая, когда $m_2 \in \{10000; 5000\}$, можно увидеть на рис. 31-38:

Анализ результатов. На рис. 39-42 представлены фазовые портреты для всех четырех рассматриваемых случаев, развернутые во времени (слева – на

всем интервале процесса, справа – на его части для 200 и 500 итераций). В результате сравнения амплитуд для исследуемых случаев, значения для которых брались в те моменты времени, когда масса технологического тела достигала значений 5000кг и 2500кг соответственно, установлено, что при этом амплитуды отличаются лишь незначительно.

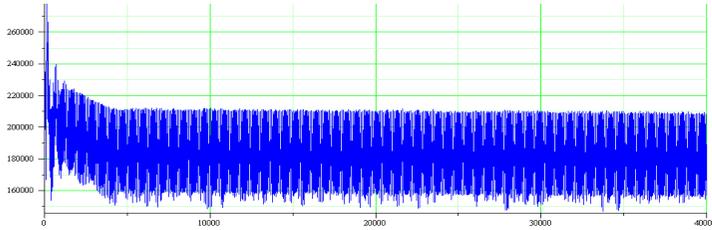


Рис. 30 – Изменение силы, действующей на пружины

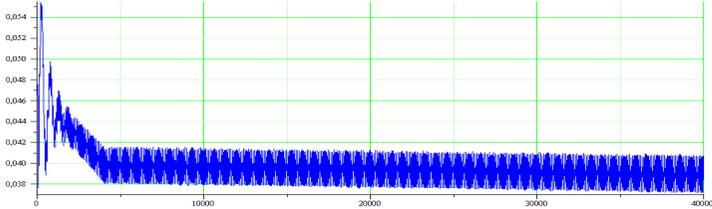


Рис. 31 – Изменение вертикальных перемещений выбивной машины

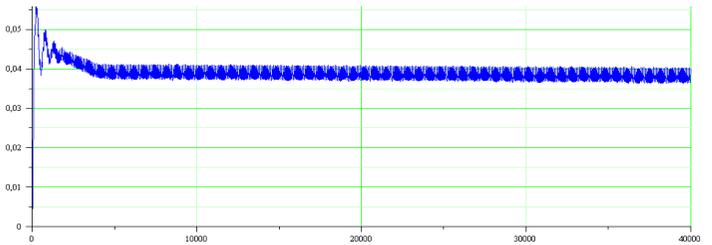


Рис. 32 – Изменение вертикальных перемещений кома

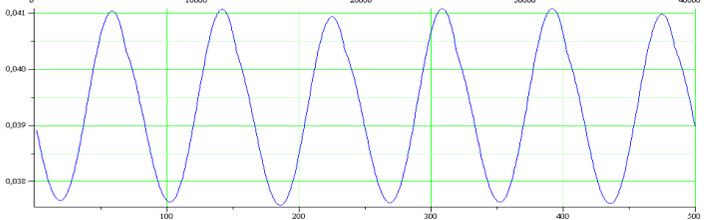


Рис. 33 – Изменение вертикальных перемещений выбивной машины

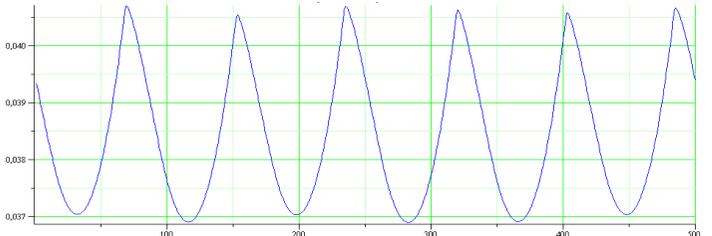


Рис. 34 – Изменение вертикальных перемещений кома

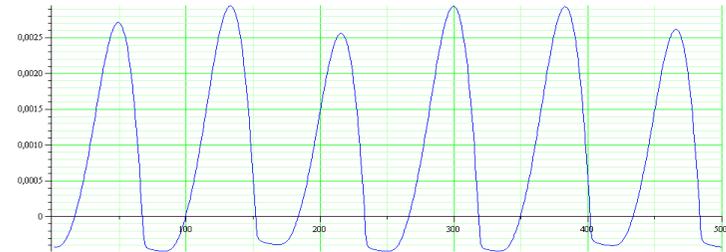


Рис. 35 – Изменение разности перемещений кома и выбивной машины

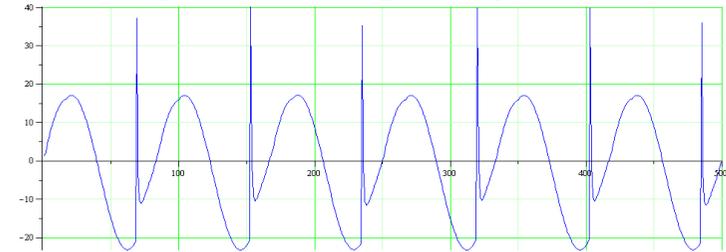


Рис. 36 – Изменение вертикальных ускорений выбивной машины

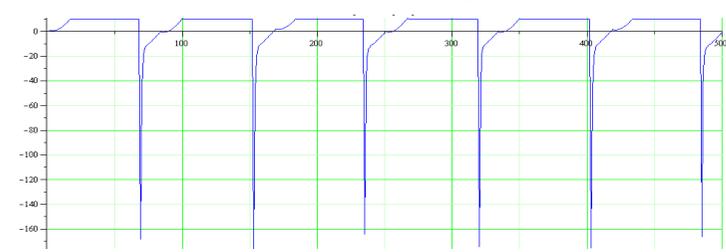


Рис. 37 – Изменение вертикальных ускорений кома

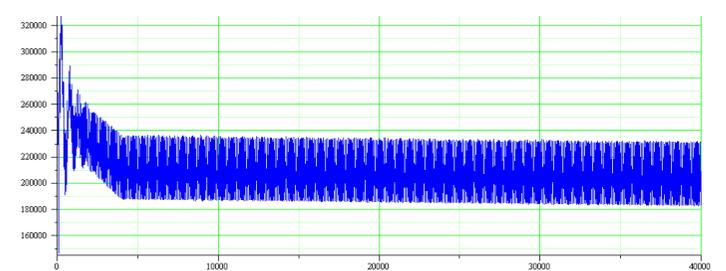


Рис. 38 – Изменение силы, действующей на пружины

Как видно из осциллограмм и фазовых портретов, само изменение массы, а также закон, определяющий его, влияют определяющим образом на характер динамических процессов в виброударной системе, но при этом не приводят к тому, что устоявшийся процесс превращается в переходной. Это обусловлено малой скоростью изменения массы технологического груза в течении одного цикла ударного взаимодействия. Учитывая также тот фактор, что скорость отделения частиц груза является почти нулевой, можно прийти к выводу, что скорость изменения массы технологического груза мала для того, чтобы ее влияние стало ощутимым на протяжении нескольких периодов колебаний.

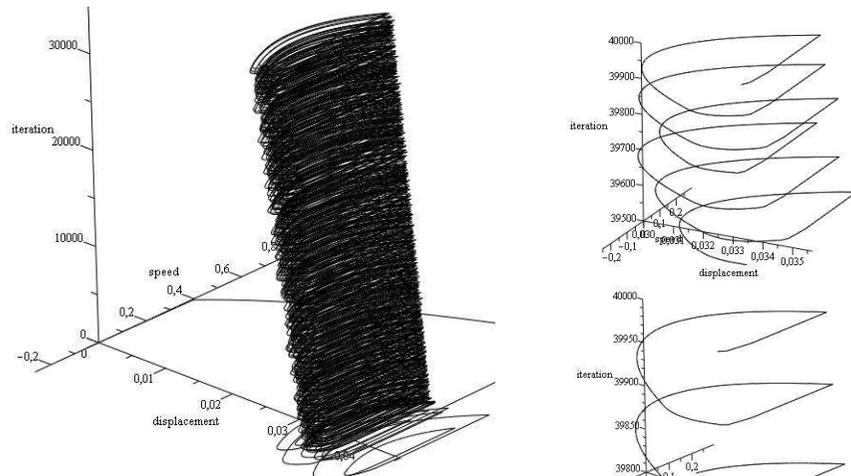


Рис. 39 – Фазовый портрет для случая, когда $m_2 \in \{5000; 2500\}$ кг и изменяется по линейному закону

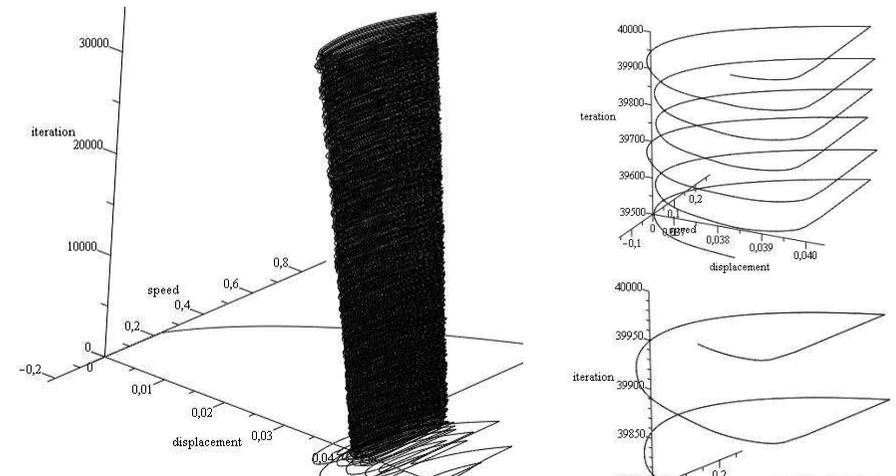


Рис. 41 – Фазовый портрет для случая, когда $m_2 \in \{10000; 5000\}$ и изменяется по линейному закону

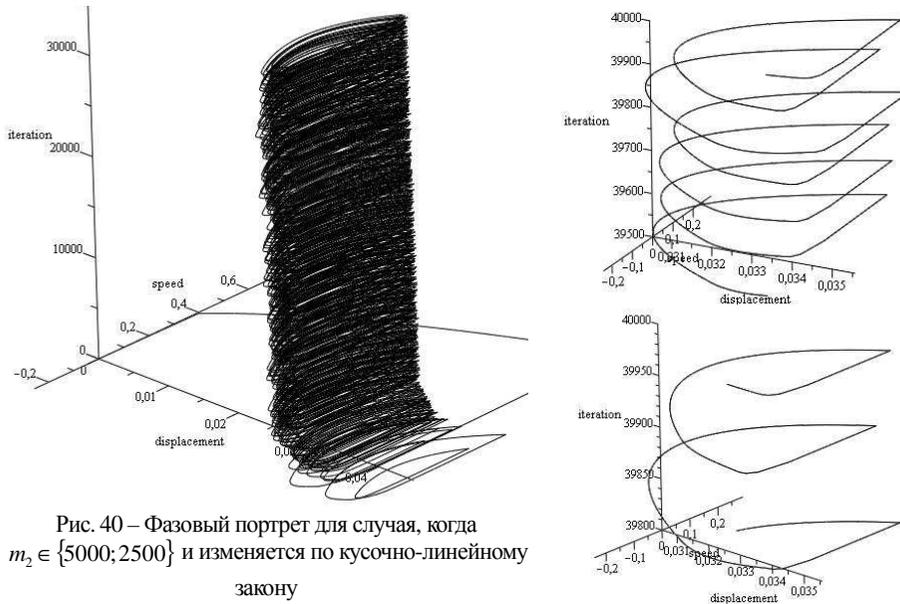


Рис. 40 – Фазовый портрет для случая, когда $m_2 \in \{5000; 2500\}$ и изменяется по кусочно-линейному закону

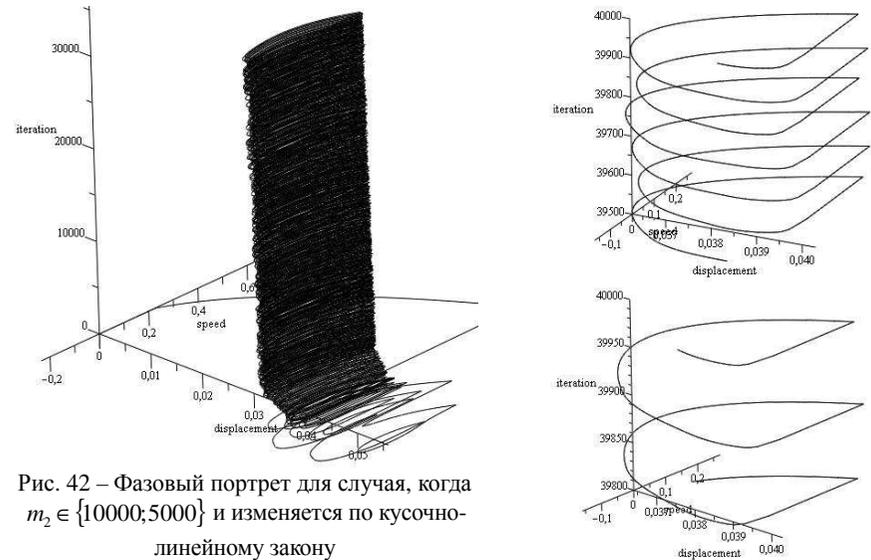


Рис. 42 – Фазовый портрет для случая, когда $m_2 \in \{10000; 5000\}$ и изменяется по кусочно-линейному закону

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработан и проверен на тестовых задачах подход, который позволяет учитывать частичное уменьшение массы технологического груза в ходе виброударного взаимодействия с машиной.

2. Изменение массы технологического груза оказывает существенное влияние на динамическое поведение виброударной системы на протяжении всего периода технологического процесса.

3. Характер влияния на динамические характеристики системы обусловлен видом закона изменения массы, которым он описан.

Исследование влияния таких факторов, как изменение вязкости контакт-

ного слоя во время технологической операции удара, совместное изменение массы технологического груза и выбивной машины, скачкообразное изменение массы груза является объектом дальнейших исследований.

Список литературы: 1. *Грабовский А.В.* О расчетно-экспериментальном моделировании динамических процессов в виброударных системах // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2009. – № 1. – С. 119-129. 2. *Грабовский А.В.* Методы и алгоритмы верификации сил ударного взаимодействия в виброударных системах // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: УДАЗТ. – 2010. – № 3/9(45). – С. 42-46. 3. *Баженов В.А., Погорелова О.С., Постникова Т.Г. и др.* Сравнительный анализ способов моделирования контактного взаимодействия в виброударных системах // Пробл. прочности. – 2009. – № 4. – С. 69-77. 4. *Баженов В.А., Погорелова О.С., Постникова Т.Г. и др.* Анализ динамики ударно-вibrационного майданчика при зміні його параметрів // Пробл. прочности. – 2008. – № 6. – С. 82-90. 5. *Ткачук Н.Н., Грабовский А.В., Ткачук Н.А.* Подход к идентификации ударной модели для виброударной системы // Вісник СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: СевНТУ. – 2010. – № 110. – С. 55-60. 6. *Вибрации в технике: Справочник в 6 томах.* – М.: Машиноведение. – 1981. 7. *Ткачук Н.А., Грабовский А.В., Ткачук Н.Н., Костенко Ю.В., Артемов И.В.* Численное моделирование динамических процессов в виброударных системах // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 42. – 2011. – С.179-187. 8. *Форсайт Дж.* Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. – М.: Мир, 1980. – 280 с.

Надійшла до редакції 12.09.2012

УДК 623.438: 539.3

А.В. ЛИТВИНЕНКО, к.т.н., гл. инж. проекта спец. конструктор. отдела научн.-техн. комплекса ЧАО „АзовЭлектроСталь”, Мариуполь

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРАГМЕНТОВ, МАКЕТОВ И НАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ ЭЛЕМЕНТОВ БРОНЕКОРПУСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Описано комплексні експериментальні дослідження фрагментів, макетів та натурних зразків бронекорпусів легкоброньованих машин. Ці результати служать основою при формуванні бази даних порівняльних розрахунково-експериментальних досліджень. Їх метою є обґрунтування достовірних, повних та точних створюваних числових моделей елементів бронекорпусів спеціальних транспортних засобів для проведення проектних досліджень їх коливань та напружено-деформованого стану. Застосовані методи вібро-акселерометрії, електротензометрії та голографічної інтерферометрії.

Ключові слова: експериментальне дослідження, бронекорпус, напружено-деформований стан, метод вібро-акселерометрії, метод електротензометрії, метод голографічної інтерферометрії

Описаны комплексные экспериментальные исследования фрагментов, макетов и натуральных образцов бронекорпусов легкобронированных машин. Эти результаты служат основой при формировании базы данных сравнительных расчетно-экспериментальных исследований. Их

© А.В. Литвиненко