

УДК 531.13; 004.942

А.А. Дозоров, В.К. Манжосов

## РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ СИЛЫ<sup>1</sup>

*Дозоров Алексей Александрович, аспирант, окончил машиностроительный факультет Ульяновского государственного технического университета, заместитель начальника службы главного технолога ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области моделирования процессов движения ударных механизмов. [e-mail: a.dozorov@bk.ru].*

*Манжосов Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор, окончил машиностроительный факультет Фрунзенского политехнического института, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» УлГТУ. Имеет статьи, монографии, изобретения в области динамики машин, моделирования процессов удара. [e-mail: v.manjosov@ulstu.ru].*

### Аннотация

Различные технологические процессы часто связаны с использованием ударных систем для нанесения периодических ударов по объекту. Изучение вопросов динамики, устойчивости движения, удароактивности таких систем требует рассмотрения виброударных процессов в системах разнообразной структуры. При этом возникает ряд проблем, которые ограничивают область приложения ударных систем: отыскание решений точными методами; учет дополнительных нелинейных факторов; анализ переходных процессов; выявление предельных циклов движения. Решение данных проблем может быть достигнуто при разработке эффективных процедур моделирования динамических систем, основанных на использовании адекватных математических моделей, визуализации процесса, представления и качественной обработки результатов моделирования.

В работе [1] рассмотрена модель виброударной системы, определены параметры системы, обеспечивающие требуемый закон движения. Однако рассмотренное кусочно-постоянное силовое воздействие можно отнести к идеальной ситуации, которую сложно реализовать для реальной системы. Возникает необходимость располагать сведениями о том, как изменение силового воздействия отразится на режиме движения ударника.

В данной работе рассмотрена модель виброударной системы при силовом воздействии в виде линейно возрастающей и линейно убывающей функции при сохранении импульса силы, длительности и периода действия силы, как при кусочно-постоянной функции. Приведена математическая модель движения ударной массы с учетом условий соударения о жесткие преграды.

Осуществлено моделирование движения виброударной системы при действии кусочно-постоянной, линейно возрастающей, линейно убывающей функции силы воздействия. Проведен сравнительный анализ приведенных результатов моделирования. Режим движения виброударной системы при действии линейно возрастающей или линейно убывающей функции изменился по сравнению с режимом, когда действовала кусочно-постоянная функция силы воздействия (хотя импульс силы сохранен в обоих случаях).

По результатам работы можно сделать выводы, что изменение характеристик линейной функции силы при сохранении импульса силы, длительности действия силы и периода цикла при соответствующем выборе параметров системы в целом не искажает периодический режим движения ударной массы, если оценивать процесс по таким критериям, как скорость удара о правый ограничитель, обеспечение одного удара за цикл с максимальной скоростью, периодичность ударов.

Ключевые слова: виброударная система, режимы движения виброударной системы, предельные циклы движения, моделирование, периодический режим движения.

## MOTION MODES OF SHOCK SYSTEM FOR FLUCTUATING FORCE LINEAR FUNCTION WITH CHANGING CHARACTERISTICS

*Aleksei Aleksandrovich Dozorov, Post-graduate Student; graduated from the Faculty of Machine-Building of Ulyanovsk State Technical University; Deputy Chief of Production Manager Service at Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; an author of articles in the field of modeling of processes of shock mechanism motion. e-mail: a.dozorov@bk.ru.*

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания № 2014/ 232 Минобрнауки России.

*Vladimir Kuzmich Manzhosov, Doctor of Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Machine-Building of Frunze Polytechnic Institute; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department at Ulyanovsk State Technical University; an author of articles, monographs and inventions in the field of dynamics of machines, modeling of shock processes. e-mail: v.manjosov@ulstu.ru.*

#### Abstract

Multiple technological processes are often related to using shock systems for performing of cyclic shocks on the object. Research of such systems' dynamics, stability of motion, shock activity level requires examination of shock processes in systems with different structures. At the same time, a number of problems, confining an area of application of shock systems, arise. They are the following: finding of solutions by exact methods; taking into account complimentary non-linear factors; analysis of transient processes; detection of limit cycles of motion. These problems can be solved by means of developing the effective dynamic system simulation procedures based on the adequate mathematical models, process visualization, and representation and good processing of simulation results.

The paper [1] provides an examination of the model of shock system, as well as the definition of its parameters, ensuring a required low of motion. However, a considered piecewise constant force impact may be applied to an ideal situation that is difficult to implement with a real system. Thus, it is required to know how the change of force impact would effect the mode of striker's motion.

The present paper deals with a model for shock system at force impact as linearly increasing and linearly decreasing function when force impulse, duration and period of the force impact are constant as at the piecewise constant function. A mathematical model for the shock mass motion under condition of collision with rigid barriers is given.

The modeling of shock system motion at the force-impact piecewise constant, linearly increasing and linearly decreasing function is implemented. The comparative analysis of presented simulation results is performed. The motion mode of shock system at linearly increasing and linearly decreasing functions has been changed against the mode at the force-impact piecewise constant function (although the force impulse was constant in both cases).

Following the results of implemented work, it may be deduced that the changing the force linear function characteristics, when impulse and duration of force, and part of cycles are constant at an appropriate system-parameter option, does not misrepresent the cyclic mode of shock mass motion if the process would be estimated at such criteria as velocity of shock to the right barrier, implementing of one impact per a cycle at the maximal velocity, and a cyclic behavior of impact.

Key words: shock system, motion modes of shock system, limit cycles of motion, modeling, cyclic mode of motion.

#### ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация различных технологических процессов часто связана с необходимостью нанесения периодических ударов по технологическому объекту с использованием ударных систем. Среди широкого круга проблем, связанных с изучением ударных взаимодействий, особое место занимает класс задач о систематических соударениях, реализуемых в виброударных системах [2–5].

Изучение вопросов динамики, устойчивости движения, удароактивности требует рассмотрения виброударных процессов в системах разнообразной структуры, имеющих нелинейности и подвергающихся действию различных сил.

Отыскание решений точными методами является весьма трудоемкой процедурой, ограничивающей область их приложений. Особенно затруднительным становится их использование при необходимости учета дополнительных нелинейных факторов и усложнении характера возмущений от действия сил. Эта процедура становится практически трудно выполнимой, если необходимо проанализировать переходные процессы в системе и выявить предельные циклы движения динамической системы.

Решение данной проблемы может быть достигнуто при разработке эффективных процедур моделирования данных динамических систем, основанных на использовании адекватных математических моделей, визуализации процесса, представления и качественной обработки результатов моделирования [6–8].

В работе [1] рассмотрена модель виброударной системы (рис. 1), представленной в виде движущегося вдоль оси  $x$  тела массой  $m$ , на которое действуют периодическая пульсирующая сила  $P(t)$  и усилие пружины жесткостью  $C$ . При движении тела массой  $m$  вдоль оси  $x$  происходит его столкновение с ограничителями (левым и правым), положение которых определяется координатами  $x_I$  и  $x_{II}$ . Полагаем, что  $x$  – координата центра масс ударника,  $\dot{x}$  – скорость ударника,  $t$  – время,  $t_1$  – длительность действия силы  $P_1$ ,  $T$  – период.

В работе [1] определены параметры системы, обеспечивающие периодические удары с заданной скоростью по правому ограничителю и реализующие требуемый закон движения ударной массы при кусочно-постоянном силовом воздействии (рис. 1). Однако кусочно-постоянное силовое воздействие можно отнести к идеальной ситуации,

к которой необходимо стремиться, но реализовать для реальных систем сложно из-за их инерционности. Возникает необходимость располагать сведениями о том, как изменение силового воздействия (при сохранении импульса силы, длительности действия силы и периода) отразится на режиме движения ударной массы. Ниже представлены результаты моделирования движения виброударной системы при изменении характеристик линейной функции  $P(t)$ .

### 1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим модель виброударной системы (рис. 2) при силовом воздействии в виде линейно возрастающей или линейно убывающей функции  $P(t)$  при сохранении импульса силы, длительности действия силы и периода, как при кусочно-постоянной силе  $P_1$ .

Качественная диаграмма периодического режима движения ударной массы, который целесообразно реализовать, представлена на рисунке 3. В начале действия силы  $P(t)$  ударник находится у левого ограничителя ( $x = x_{II}$ ) и скорость ударника равна  $\dot{x}_2^+$ . Под действием силы  $P(t)$  ударник, преодолевая силу упруго сжимаемой пружины, перемещается в направлении правого ограничителя. Ударник достигает правого ограничителя ( $x = x_I$ ) и наносит удар со скоростью  $\dot{x}_1^-$ . В идеальном случае удар целесообразно осуществить при  $t = t_1$ .

Полагаем, что удар мгновенный и скорость ударника после нанесения удара принимает значение  $\dot{x}_1^+ = -k_1 \dot{x}_1^-$ , где  $k_1$  – коэффициент восстановления скорости при ударе о правый ограничитель.

На интервале  $t_1 \leq t < T$  сила  $P(t) = 0$  и ударник перемещается к левому ограничителю под действием силы упруго сжатой пружины. Ударник достигнет левого ограничителя ( $x = x_{II}$ ), имея перед столкновением с ним скорость  $\dot{x}_2^-$  (в идеальном случае целесообразно, чтобы ударник достиг левого ограничителя при  $t = T$ ).

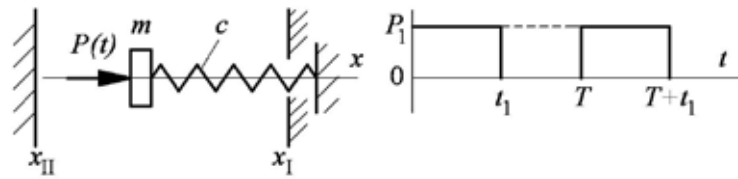


Рис. 1. Схема ударной системы с упругим элементом и ограничителями

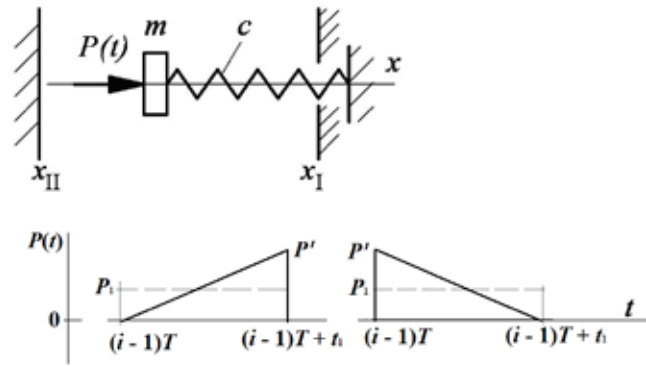


Рис. 2. Схема ударной системы при произвольном характере силового воздействия

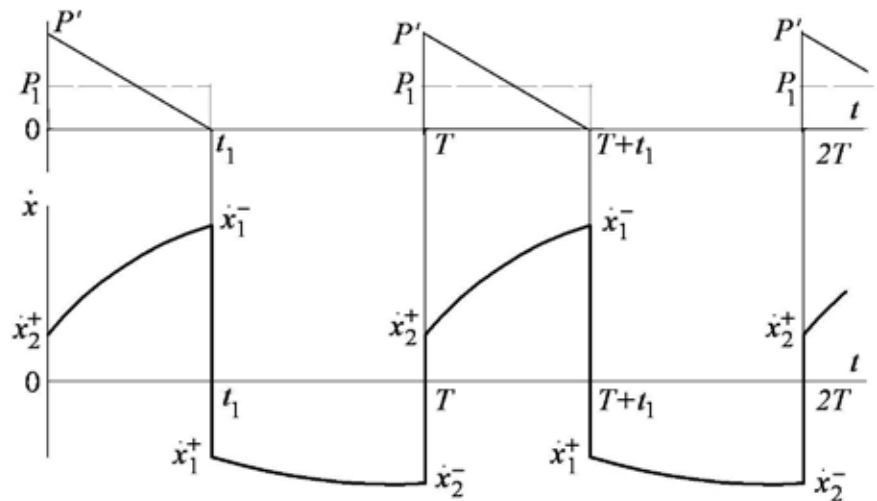


Рис. 3. Качественная диаграмма периодического режима движения ударной массы

При столкновении с левым ограничителем скорость ударника принимает значение  $\dot{x}_2^+ = -k_2 \dot{x}_2^-$ , где  $k_2$  – коэффициент восстановления скорости при ударе о левый ограничитель. В этот момент целесообразно, чтобы на ударник вновь действовала сила  $P(t)$ . Далее процесс движения повторяется.

Движение ударной массы с учетом условий соударения о жесткие ограничители описывается уравнениями:

$$m\ddot{x} = \begin{cases} P(t) - c(\Delta + x), & \text{если } (i-1)T \leq t < (i-1)T + t_1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \\ -c(\Delta + x), & \text{если } (i-1)T + t_1 \leq t < i \cdot T, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \end{cases}$$

$$\Delta = \Delta_0 - x_{II}, \quad x|_{t=0} = x_0, \quad \dot{x}|_{t=0} = \dot{x}_0,$$

при  $x = x_1, \quad \dot{x} = \dot{x}_1^+ = -k_1 \dot{x}_1^-, \quad \text{если } \dot{x}_1^- > 0,$

при  $x = x_{ii}$ ,  $\dot{x} = \dot{x}_2^+ = -k_2 \dot{x}_2^-$ , если  $\dot{x}_2^- < 0$ , где  $i$  – номер цикла,  $\Delta$  – максимальная осадка пружины,  $\Delta_0$  – осадка пружины при расположении ударной массы у левого ограничителя,  $x_0$  – начальная координата,  $\dot{x}_0$  – начальная скорость ударной массы.

Так как сила  $P(t)$  является кусочно-постоянной на каждом периоде действия (рис. 1), то для определения импульса силы достаточно рассмотреть один период. На первом цикле при  $i = 1$  сила  $P(t)$ , разгоняющая ударную массу  $m$  на интервале  $0 \leq t < t_1$ , создает импульс  $I = \int_0^{t_1} P(t) dt$ . Для периодической пульсирующей кусочно-постоянной силы  $P_1 = const$  можно записать  $I = \int_0^{t_1} P_1 dt = P_1 \cdot t \Big|_0^{t_1} = P_1 \cdot t_1$ .

Для линейной функции  $P(t)$  при сохранении тех же параметров системы, что и для периодической пульсирующей кусочно-постоянной силы  $P_1$ , потребуем, чтобы импульс силы  $P(t)$  на интервале  $0 \leq t < t_1$  был равен импульсу силы  $P_1$  за время  $t_1$ :

$$\int_0^{t_1} P(t) dt = P_1 \cdot t_1. \quad (1)$$

## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ УДАРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ СИЛЫ И СОХРАНЕНИИ ИМПУЛЬСА СИЛЫ

### 2.1 Линейно возрастающая сила

Рассмотрим случай, когда функция  $P(t)$  линейно возрастает от 0 до  $P_1'$  и описывается уравнениями:

$$P(t) = \begin{cases} P_1' \frac{t - (i-1)T}{t_1}, & \text{если } (i-1)T \leq t < (i-1)T + t_1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \\ 0, & \text{если } (i-1)T + t_1 \leq t < i \cdot T, \quad i = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2)$$

Диаграмма функции  $P(t)$  изображена на рисунке 4.

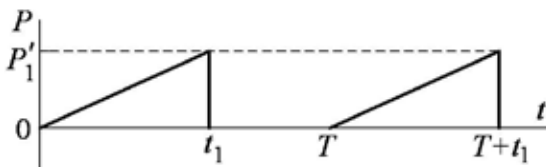


Рис. 4. Диаграмма периодической линейно возрастающей функции  $P(t)$

Учитывая (1) и (2) при  $i = 1$  на интервале  $0 \leq t < t_1$ , получим:

$$\int_0^{t_1} P_1' \frac{t}{t_1} dt = \frac{P_1'}{t_1} \cdot \frac{t^2}{2} \Big|_0^{t_1} = \frac{P_1' \cdot t_1}{2} = P_1 \cdot t_1 \Rightarrow P_1' = 2P_1.$$

Так как линейно возрастающая функция  $P(t)$  является периодической (рис. 4), то полученное равенство справедливо для каждого периода действия  $P(t)$ .

Осуществлено моделирование движения виброударной системы при действии кусочно-постоянной силы  $P_1$ , диаграмма которой представлена на рисунке 1, и силы  $P(t)$ , диаграмма которой представлена на рисунке 4. Реализуем характеристики цикла, обеспечивающие периодический режим движения ударной массы, установленные в [1] для кусочно-постоянной силы  $P_1$ :  $P_1 = 400$  Н;  $T = 0,038$  с;  $t_1 = 0,012$  с;  $k_1 = 0,2$ ;  $k_2 = 0,02$ ;  $c = 1000$  Н/м;  $x_1 = 0$ ;  $x_{ii} = -0,03$  м. Результаты моделирования представлены на рисунке 5.

После остановки процедуры расчета отображаются диаграммы перемещения (диаграмма 2) и скорости (диаграмма 1) объекта, а также диаграмма силы  $P(t)$  – диаграмма 3. По оси абсцисс откладывается расчетное время  $t$ , с. Значение скорости объекта определяется как  $v = k_v \cdot \bar{v}$ , где  $k_v$  – коэффициент, определяющий масштаб диаграммы скорости;  $\bar{v}$  – числовое значение скорости на оси ординат.

Значение перемещения объекта определяется как  $x = k_x \cdot \bar{x}$ , где  $k_x$  – коэффициент, определяющий масштаб диаграммы перемещения;  $\bar{x}$  – числовое значение перемещения на оси ординат. Значение силы  $P(t)$  определяется как  $P = k_p \bar{P}$ , где  $k_p$  – коэффициент, определяющий масштаб диаграммы силы  $P(t)$ ;  $\bar{P}$  – числовое значение силы на оси ординат.

Результаты моделирования движения виброударной системы при действии линейно возрастающей силы  $P(t)$  и тех же характеристиках цикла (кроме  $P_1' = 2P_1 = 800$  Н):  $T = 0,038$  с;  $t_1 = 0,012$  с;  $k_1 = 0,2$ ;  $k_2 = 0,02$ ;  $c = 1000$  Н/м;  $x_1 = 0$ ;  $x_{ii} = -0,03$  м – представлены на рисунке 6.

Режим движения виброударной системы при действии линейно возрастающей силы  $P(t)$  изменился по сравнению с предыдущим случаем, когда действовала кусочно-постоянная сила  $P_1$  (хотя импульс силы сохранен в обоих случаях). Скорость ударника в момент окончания действия силы  $P(t)$  практически такая же, как и для кусочно-постоянной силы  $P_1$  (она составляет величину порядка 4,7 м/с). Однако удар о правый ограничитель наступает позже времени окончания действия силы  $P(t)$ . Поэтому, как видно из диаграмм 1 и 3, скорость после завершения действия силы  $P(t)$ , падает, так как ударник при перемещении в направлении правого ограничителя продолжает преодолевать силу упруго сжимаемой пружины.

Изменение режима связано также с возникновением сдвига начала движения ударника от левого ограничителя и начала действия силы  $P(t)$ . Появление этого сдвига связано с тем, что сила  $P(t)$  начинает действовать от нуля и должна достигнуть величины  $c\Delta_0$ , чтобы начать преодолевать силу упруго сжимаемой пружины.

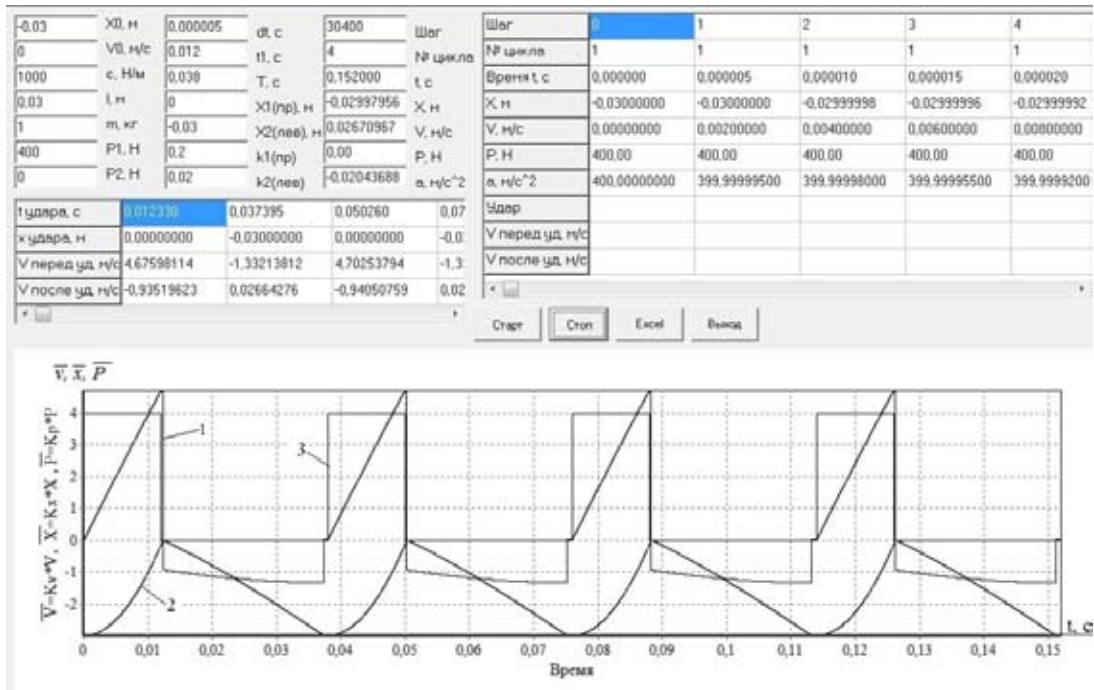


Рис. 5. Результаты моделирования: 1 – диаграмма скорости  $v$  ударной массы,  $k_v = 1$  м/с; 2 – диаграмма перемещения  $x$ ,  $k_x = 0,01$  м; 3 – диаграмма силы  $P_1$  при  $k_p = 0,01$  Н

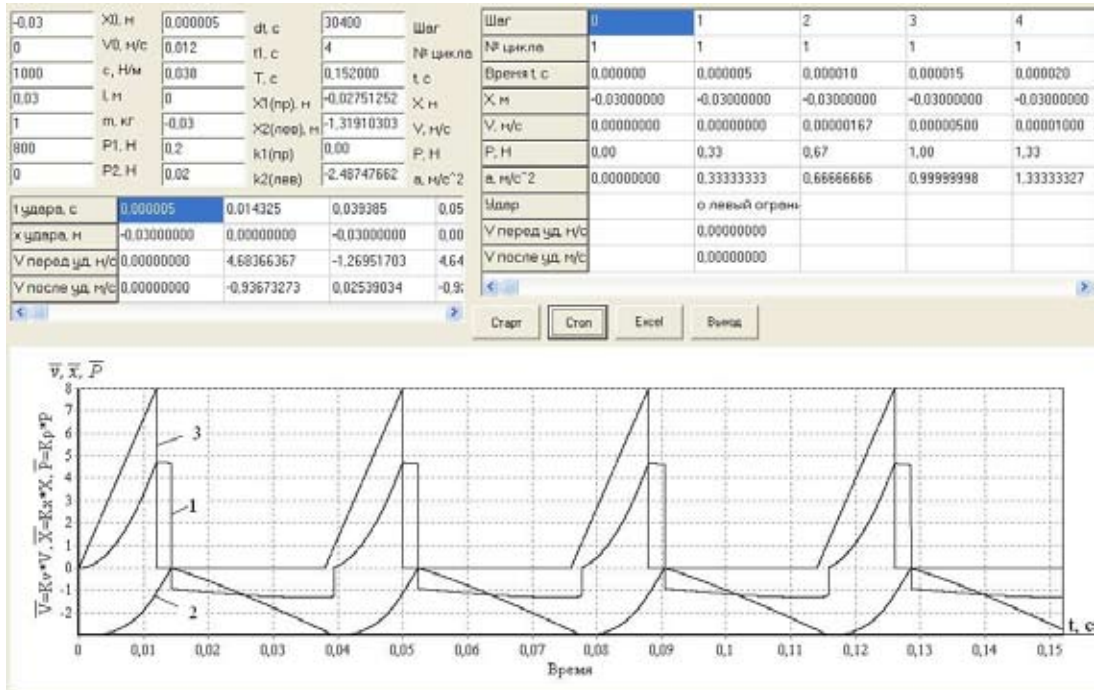


Рис. 6. Результаты моделирования при действии линейно возрастающей силы  $P(t)$ : 1 – диаграмма скорости  $v$  ударной массы,  $k_v = 1$  м/с; 2 – диаграмма перемещения  $x$ ,  $k_x = 0,01$  м; 3 – диаграмма силы  $P(t)$  при  $k_p = 0,01$  Н ( $P_1' = 800$  Н)

Обратим внимание на то, что параметры системы, обеспечивающие периодический режим движения ударной массы для кусочно-постоянной силы  $P_1$  [1] ( $P_1 = 400$  Н;  $T = 0,038$  с;  $t_1 = 0,012$  с;  $k_1 = 0,2$ ;  $k_2 = 0,02$ ;  $c = 1000$  Н/м;  $x_1 = 0$ ;  $x_{II} = -0,03$  м), не искажают в целом

периодический режим движения ударной массы при линейно возрастающей силе  $P(t)$ . Удар о правый ограничитель происходит со скоростью 4,64 м/с (что менее, чем на 1,5% отличается от предупредной скорости при кусочно-постоянной силе  $P_1$ ). Движение в цикле происходит с од-

ним ударом о правый ограничитель, время между двумя последовательными ударами о правый ограничитель соответствует периоду цикла.

**2.2 Линейно убывающая сила**

Рассмотрим случай, когда функция  $P(t)$  линейно убывающая от 0 до  $P_1'$  и описывается уравнениями:

$$P(t) = \begin{cases} P_1' \left( 1 - \frac{t - (i-1)T}{t_1} \right), & \text{если } (i-1)T \leq t < (i-1)T + t_1, i = 1, 2, 3, \dots \\ 0, & \text{если } (i-1)T + t_1 \leq t < i \cdot T, i = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3)$$

Диаграмма функции  $P(t)$  изображена на рисунке 7.

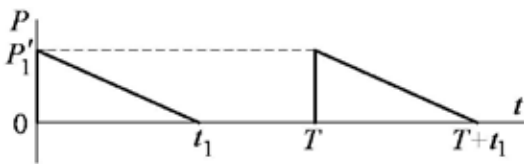


Рис. 7. Диаграмма периодической линейно убывающей функции  $P(t)$

Учитывая (1) и (3) при  $i=1$  на интервале  $0 \leq t < t_1$ , получим:

$$\int_0^{t_1} P_1' \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right) dt = P_1' \left( t - \frac{t^2}{2t_1} \right) \Big|_0^{t_1} = \frac{P_1' \cdot t_1}{2} = P_1 \cdot t_1 \Rightarrow P_1' = 2P_1.$$

Так как линейно возрастающая функция  $P(t)$  является периодической (рис. 7), то полученное равенство справедливо для каждого периода действия  $P(t)$ .

Результаты моделирования движения виброударной системы при действии линейно убывающей силы  $P(t)$  и тех же характеристиках цикла, как и для кусочно-постоянной силы (кроме  $P_1' = 2P_1 = 800$  Н):  $T = 0,038$  с;  $t_1 = 0,012$  с;  $k_1 = 0,2$ ;  $k_2 = 0,02$ ;  $c = 1000$  Н/м;  $x_1 = 0$ ;  $x_{II} = -0,03$  м – представлены на рисунке 8.

Режим движения виброударной системы при действии линейно убывающей силы  $P(t)$  изменился по сравнению с предыдущими случаями, когда действовали кусочно-постоянная сила  $P_1$  (рис. 5) и линейно возрастающая сила (рис. 6), хотя импульс силы сохранен во всех случаях.

Удар о правый ограничитель наступает раньше времени окончания действия силы  $P(t)$ . Поэтому, как видно из диаграммы, часть импульса силы  $P(t)$  затрачивается на то, чтобы удержать ударник у правого ограничителя и следствием этого является незначительное снижение скорости ударника  $\dot{x}_1^+$ , которую он приобрел после удара о правый ограничитель.

Обратим внимание на то, что параметры системы, обеспечивающие периодический режим движения ударной

-0,03	X0, м	0,000005	dt, с	30400	Шаг	0	1	2	3	4
0	V0, м/с	0,012	tl, с	4	№ цикла	1	1	1	1	1
1000	c, Н/м	0,038	T, с	0,152000	Время t, с	0,000000	0,000005	0,000010	0,000015	0,000020
0,03	l, м	0	X1(пр), м	-0,029998410	X, м	-0,030000000	-0,029999999	-0,029999996	-0,029999991	-0,029999984
1	m, кг	-0,03	X2(лев), м	0,02503415	V, м/с	0,000000000	0,004000000	0,007998333	0,011995000	0,015990000
800	P1, Н	0,2	k1(пр)	0,00	P, Н	800,00	799,67	799,33	799,00	798,67
0	P2, Н	0,02	k2(лев)	-0,01589882	a, м/с <sup>2</sup>	800,000000000	799,66665670	799,33329330	798,99991000	798,6665067
t удара, с	0,010305	0,037365	0,048245	0,07	Удар					
x удара, м	0,00000000	-0,03000000	0,00000000	-0,0	V перед уд. м/с					
V перед уд. м/с	4,59199754	-1,25420858	4,61049437	-1,2	V после уд. м/с					
V после уд. м/с	-0,91839951	0,02508417	-0,92209887	0,02						

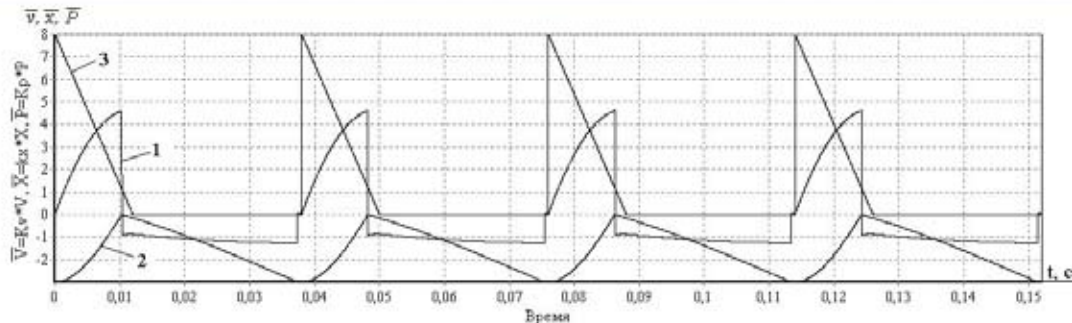


Рис. 8. Результаты моделирования при действии линейно убывающей силы  $P(t)$ :

- 1 – диаграмма скорости  $v$  ударной массы,  $k_v = 1$  м/с;
- 2 – диаграмма перемещения  $x$ ,  $k_x = 0,01$  м;
- 3 – диаграмма силы  $P(t)$  при  $k_p = 0,01$  Н ( $P_1' = 800$  Н)

массы для кусочно-постоянной силы  $P_1$  [1] ( $P_1=400$  Н;  $T=0,038$  с;  $t_1=0,012$  с;  $k_1=0,2$ ;  $k_2=0,02$ ;  $c=1000$  Н/м;  $x_1=0$ ;  $x_{II}=-0,03$  м), не искажают в целом периодический режим движения ударной массы при линейно убывающей силе  $P(t)$ . Удар о правый ограничитель происходит со скоростью 4,61 м/с (что менее, чем на 2% отличается от предупредной скорости при кусочно-постоянной силе  $P_1$ ). Движение в цикле происходит с одним ударом о правый ограничитель, время между двумя последовательными ударами о правый ограничитель соответствует периоду цикла.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение характеристик линейной функции силы  $P(t)$  при сохранении импульса силы, длительности действия силы и периода цикла при соответствующем выборе параметров системы в целом не искажает периодический режим движения ударной массы, если оценивать процесс по таким критериям, как скорость удара о правый ограничитель, обеспечение одного удара за цикл с максимальной скоростью, периодичность ударов.

При сохранении импульса силы, обеспечивающего одинаковые скорости ударной массы по завершении действия силы, следует обращать внимание на конечные перемещения ударной массы под действием силы  $P(t)$ . Эти перемещения должны быть такими, чтобы удар по правому ограничителю был нанесен в момент, близкий к окончанию действия силы  $P(t)$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дозоров А.А., Манжосов В.К. Моделирование переходных процессов движения ударной системы при периодической пульсирующей силе и соударениях о жесткие преграды // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 4 (30). – С. 55–61.
2. Ашавский А.М., Вольперт А.Я., Шейбаум В.С. Силовые импульсные системы. – М.: Машиностроение, 1978. – 194 с.
3. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
4. Лавендел Э.Э. Синтез оптимальных вибромашин. – Рига: Зинатне, 1977. – 252 с.
5. Batako A.D., Babitsky V.I. and N.A. Halliwell Modelling of Vibro-Impact Penetration of Self-Exciting Drill bit // Journal of Sound and Vibration, 2004, (271), pp. 209–225.
6. Манжосов В.К., Новиков Д.А. Управление процессом моделирования движения объекта с ударами о преграду // Программные продукты и системы. – 2012. – № 4. – С. 193–198.

7. Моделирование виброударной системы при периодическом силовом воздействии с учетом явления дрейфа: св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ / Манжосов В.К., Новиков Д.А., Корняков Д.Е., Муромцев И.И. – № 2010614035; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 22.06.10.

8. Манжосов В.К., Новиков Д.А. Моделирование режимов движения ударной системы при периодическом силовом воздействии // Известия Саратовского университета. Сер. Математика. Информатика. – 2010. – Т. 10, вып. 4. – С. 65–71.

### REFERENCES

1. Dozorov A.A., Manzhosov V.K. Modelirovaniye perekhodnykh protsessov dvizheniya udarnoy sistemy pri periodicheskoy pulsiruyushchey sile i soudareniyakh o zhestkiye pregrady [Modeling of Transient Processes of Shock System Motion at Periodic Pulsing Force and when Collision with Rigid Barriers]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2012, no. 4 (30), pp. 55–61.
2. Ashavskiy A.M., Volpert A.Ya., Sheynbaum V.S. *Silovyye impulsnyye sistemy* [Power Pulse System]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 194 p.
3. Babitskiy V.I. *Teoriya vibroudarnykh system* [Shock System Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 352 p.
4. Lavendelis E.E. *Sintez optimalnykh vibromashin* [Synthesis of Optimal Vibro-Machines]. Riga, Zinatne Press Publ., 1977. 252 p.
5. Batako A.D., Babitsky V.I., and Halliwell N.A. Modelling of Vibro-Impact Penetration of Self-Exciting Drill bit. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol. 271, pp. 209–225.
6. Manzhosov V.K., Novikov D.A. Upravleniye protsessom modelirovaniya dvizheniya obyektov s udarami o pregradu [Modeling Control of the Object Motion with Shocks on the Stopper]. *Programmnyye produkty i sistemy* [Software Product and Systems], 2012, no.4, pp. 193–198.
7. Manzhosov V.K., Novikov D.A., Korniyakov D.E., Muromtsev I.I. *Modelirovaniye vibroudarnoy sistemy pri periodicheskom silovom vozdeystvii s uchetom yavleniya drebezga*. Certificate on official registration of the computer program, No 2010614035, 22.06.2010. (In Russian, in Program Register).
8. Manzhosov V.K., Novikov D.A. Modelirovaniye rezhimov dvizheniya udarnoy sistemy pri periodicheskom silovom vozdeystvii [Modeling of Motion Modes for the Shock System at Cyclic Force Action]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser. Matematika. Informatika* [Proceedings of the Saratov University, Mathematics and Informatics], 2010, vol. 10, no. 4, pp. 65–71.