

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ И КРИТЕРИЕВ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА НА МЕХАТРОННЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДАХ

Испытания на воздействие многократных ударов являются важной частью разработки любого изделия. Испытания проводят на стендах многократных ударов. С целью расширения диапазона функциональных параметров мехатронных стендов многократных ударов предложены: критерии выбора параметров пневматической подвески, метод прогнозирования изменения жесткости формователя при работе стенда и метод оценки влияния воспроизводимости управляемых параметров на стабильность ударного импульса. В отличие от известных работ предлагаемые критерии и методы учитывают требования по воспроизводимости ударного импульса.

Ключевые слова: стенд многократных ударов, испытания, пневматический привод, стабильность воспроизведения, параметры ударного импульса.

Потребность в ударных стендах отечественного производства постоянно растет в связи с необходимостью импортозамещения. При испытаниях на воздействие многократных ударов помимо длительности и пикового значения импульса нормируется частота следования ударов, а также воспроизводимость: возможность выполнять большое количество ударов без выхода параметров ударного импульса за пределы допуска.

Требования стандартов по частоте следования ударов можно обеспечить, применяя стенды с кулачковым [1] или пневматическим приводом [2]. Требования по воспроизводимости импульса в широком диапазоне функциональных параметров стенда на практике обеспечить не удается.

Задача исследований — получение рекомендаций по расширению диапазона функциональных параметров стендов многократных ударов (пикового значения, длительности, частоты следования ударов).

Пневматический привод — наиболее рациональное решение при создании стендов многократных ударов [3]. На рис. 1 представлена пневмокинематическая схема стенда с новым приводом, разработанным при участии авторов [4].

Стенд работает следующим образом. Подвижный стол стенда 9 вместе с закрепленным на нем изделием 8 поднимается на заданную высоту. Далее происходит падение стола с изделием под собственным весом либо с дополнительным разгоном от ускорителя. При соударении стола с формователем импульса 14 создается ускорение торможения, как правило, в виде полусинусоидального импульса. При этом пиковое значение импульса

А зависит от скорости соударения стола и формователя, а длительность импульса τ от жесткости формователя [5]:

$$A = \frac{\pi \cdot v}{\tau}; \tau = \pi \sqrt{\frac{m}{c}},$$

где v — скорость соударения, m — масса подвижной части (стола и изделия), c — жесткость формователя.

Формователь устанавливается на массивный инерционный блок 13 (далее ИБ), который, в свою очередь, соединен с неподвижной плитой-основанием 15 через пневматическую подвеску, состоящую из пневмопружины 12 и амортизатора 11.

Стол приводится в движение с помощью пневматического цилиндра 6, который соединен с пневмомагистралью 5 коммутирующей аппаратурой: электропневматическим преобразователем давления поршневой 1 и штоковой 3 полости; распределителем 2 и 4. Распределители и преобразователи получают управляющие сигналы с контроллера, которые формируются по специальному алгоритму [6]. Стенд имеет интегрированный акселерометр 7, сигналы с которого также поступают в контроллер и сравниваются с заданием, установленным оператором.

Скоростью соударения стола и формователя можно управлять с помощью изменения параметров (далее управляемые параметры): давления, подаваемого в поршневую полость p_n ; давления, подаваемого в штоковую полость p_y ; длительности подачи давления в поршневую полость Δt_n ; длительности подачи давления в штоковую полость Δt_y .

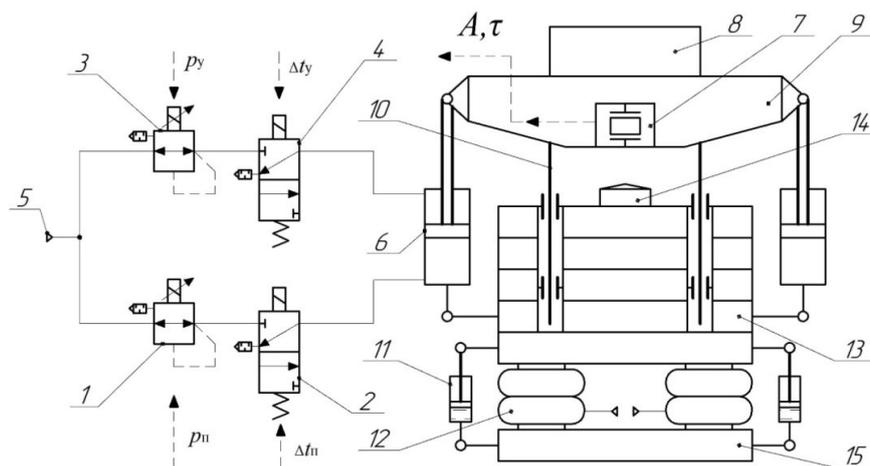


Рис. 1. Пневмокинематическая схема стенда многократных ударов

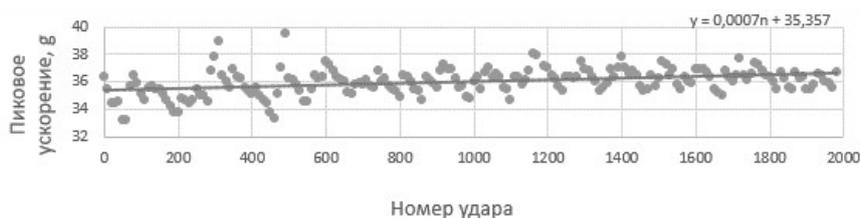


Рис. 2. Зависимость пикового ускорения от номера удара в испытании

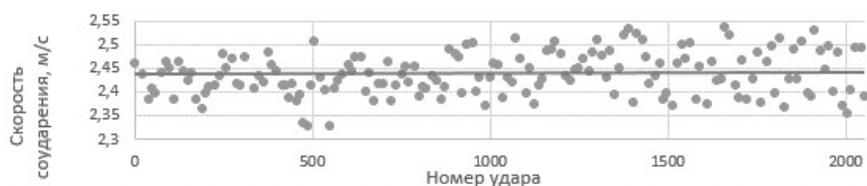


Рис. 3. Зависимость скорости соударения от номера удара в испытании

С помощью параметров p_n и Δt_n регулируется высота подъема стола, а параметры p_y и Δt_y позволяют регулировать дополнительное ускорение стола при движении вниз.

Нестабильность воспроизведения ударного импульса легко показать с помощью эксперимента. На разработанном по вышеописанной схеме ударном стенде СМУ300 [7] выполнена серия из 2000 одинаковых ударов. На рис. 2 представлен график пиковых значений ускорения в зависимости от номера удара.

Применив линейную интерполяцию можно заметить, что помимо разброса значений пикового ускорения наблюдается тенденция к его увеличению с ростом количества ударов. При этом видно, что скорость соударения не имеет тенденции роста с количеством ударов рис. 3.

Таким образом, можно выделить два вида нестабильности воспроизведения параметров ударного импульса: разброс пиковых значений импульса из-за разброса значения скорости перед соударением, а также уход «средней» линии из-за изменения свойств формователя в процессе работы. Дальнейшие эксперименты показывают, что разброс значения скорости перед соударением вызван нестабильностью воспроизведения управляемых параметров, а также колебаниями ИБ на пневматической подвеске.

Чтобы корректно учесть уход «средней» линии ускорения из-за изменения свойств формовате-

ля необходимо учитывать, что реальное значение жесткости формователя зависит от его деформации. Для этого применены и адаптированы известные методы определения нелинейной жесткости формователя: метод интегрирования экспериментальной зависимости $A(t)$ [8] (далее метод 1) и метод конечных элементов (метод 2) [9].

Известные методы не учитывают большое количество ударов в испытании и, как следствие, возможные изменения свойств формователя в процессе испытаний. Теоретическое описание нелинейного деформирования с учетом старения — сложная и нетривиальная задача, которой посвящены отдельные работы [10]. В настоящей работе для учета изменения свойств формователя предложен новый метод, основанный на эксперименте.

Метод заключается в поиске закономерности изменения коэффициентов, описывающих усредненную кривую силы упругости формователя $F(x)$. За исходную кривую $F_0(x)$ принимается кривая, полученная методом 1 или 2. На рис. 4 показаны силы упругости, найденные предложенным методом для формователя стенда СМУ300.

При сравнении характеристики жесткости первого удара и характеристики для 2000-го удара можно отметить усиливающееся расхождение кривых с увеличением деформации формователя.

Проверка корректности полученных результатов выполнена экспериментально на стенде СМУ300 (рис. 5).

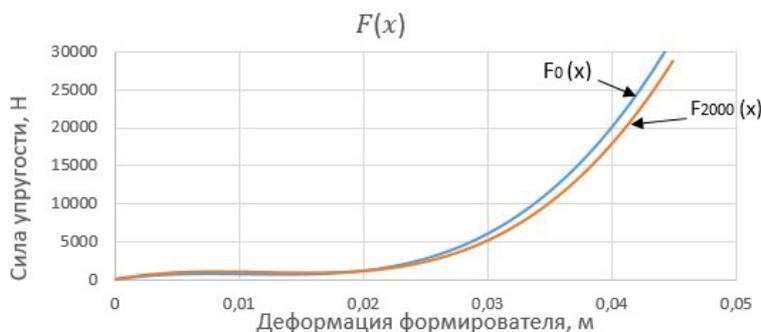


Рис. 4. Сила упругости формиратора для первого удара и 2000-го

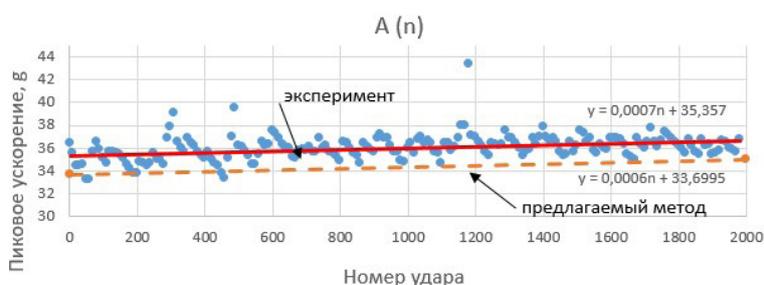


Рис. 5. Зависимость пикового ускорения от количества ударов

Благодаря предложенному методу модифицирован алгоритм настройки: управляемые параметры корректируются до выхода пикового значения за пределы допуска.

Другой причиной нестабильности воспроизведения импульса являются колебательные движения ИБ из-за наличия пневматической подвески. Таким образом, чтобы скорость соударения стола и ИБ оставалась неизменной от удара к удару, необходимо, чтобы следующий цикл удара начинался при нулевой (близкой к нулевой) скорости ИБ. Наличие пневматической подвески позволяет отказаться от строительства специального фундамента и использовать стандартный цеховой пол, который имеет ограничение по допускаемой динамической нагрузке.

Следовательно, можно выделить два основных критерия выбора параметров пневматической подвески:

- скорость ИБ к моменту начала нового цикла удара должна быть равна нулю или близка к нулю;
- максимальное динамическое усилие от работы стенда не должно превышать допускаемое для пола цеха.

Для подбора параметров пневматической подвески с учетом выделенных критериев разработана её математическая модель. На рис. 6 представлена расчетная схема математической модели колебаний инерционного блока на пневматической подвеске. В качестве пневматической пружины используется пневмоцилиндр.

Уравнение, описывающее движение ИБ, согласно расчетной схеме будет выглядеть так:

$$M \cdot \ddot{x} = F_c(x) + F_a(\dot{x}) - F_s(t) - M \cdot g, \quad (1)$$

где M — масса инерционного блока; x — координата инерционного блока; $F_a(\dot{x})$ — сила сопротивления амортизаторов; $F_c(x)$ — сила упругости пневматической пружины (цилиндра); $F_s(t)$ — сила упругости формиратора. В работе авторов [11] да-

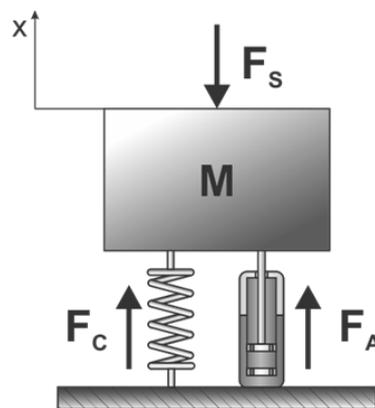


Рис. 6. Расчетная схема модели подвески

ется подробное описание сил, входящих в уравнение движения ИБ.

Для численного решения уравнения (1) в среде Matlab Simulink создана компьютерная модель. На рис. 7 представлены результаты моделирования работы пневматической подвески стенда СМУ300 для характерных режимов испытаний. Самое большое и длительное перемещение вызывает удар с пиковым ускорением, равным 150 g и длительностью импульса, равной 5 мс. Исследование модели для других режимов показало, что при выборе параметров пневматической подвески необходимо рассматривать все режимы испытаний, достаточно выбрать режим с наибольшим значением произведения $A \cdot t$.

На рис. 7 перемещение ИБ после удара можно разделить на две фазы: быструю и медленную. Во время быстрой фазы происходит основное колебательное движение, а во время медленной фазы ИБ стремится вернуться в исходную точку, но амортизаторы сильно замедляют этот процесс. Чтобы обеспечить воспроизводимость, следующий цикл

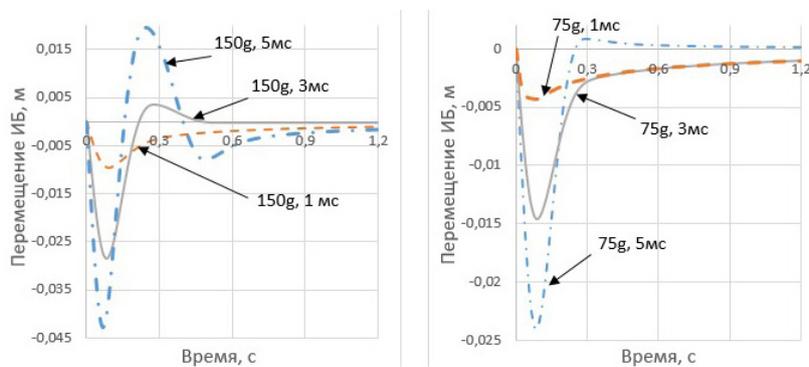


Рис. 7. Перемещение инерционного блока для характерных режимов испытаний

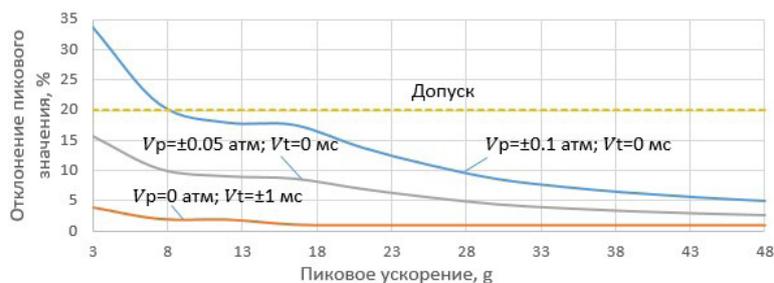


Рис. 8. Зависимость процентного отклонения пикового ускорения от величины пикового ускорения

удара должен начаться во время медленной фазы, когда скорость инерционного блока близка к нулю.

Таким образом, используя предложенную компьютерную модель, а также зная требуемую частоту следования ударов и допускаемое усилие на пол цеха, можно выбирать элементы пневматической подвески, которые обеспечат воспроизводимость импульса.

Следующая причина разброса скорости соударения стола и формователя — расхождение между значениями управляемых параметров при первой и повторной подаче одинакового управляющего сигнала (воспроизводимость управляемых параметров).

Для оценки влияния воспроизводимости управляемых параметров на стабильность пикового ускорения использована формула процентного отклонения:

$$\Delta A = \frac{A(p_n \pm V_p, \Delta t_n \pm V_t)}{A(p_n, \Delta t_n)} \cdot 100\% - 100\%,$$

где V_p — воспроизводимость давления, которая зависит от типа электропневматического преобразователя, V_t — воспроизводимость длительности включения распределителя, для большинства распределителей равна ± 1 мс. Зависимость $A(p_n, \Delta t_n)$ найдена в работе [7]:

$$A(p_n, \Delta t_n) = \frac{\pi}{\tau} \sqrt{\frac{p_n S_n \cdot (p_n S_n - mg - F_s) \cdot (mg - F_s)}{m^2 \cdot (mg + F_s)}} \cdot \Delta t_n,$$

где S_n — площадь поршня приводного цилиндра; F_s — сила трения в направляющих стэнда.

Видно (рис. 8), что с увеличением пикового ускорения отклонение уменьшается. Воспроизводимость длительности включения распределителя

влияет на отклонение не так существенно, как воспроизводимость давления, и не превышает 5 %.

Большинство выпускаемых преобразователей имеет воспроизводимость $V_p = 0,1$ атм, однако существуют специальные исполнения с воспроизводимостью $V_p = 0,05$ атм.

Оценка влияния воспроизводимости управляемых параметров на стабильность ударного импульса показала, что для стабильного воспроизведения пиковых ускорений менее 10 г требуются компоненты с повышенными параметрами воспроизводимости.

Подводя итог работы, следует отметить, что добиться воспроизводимости импульса на стэнде многократных ударов можно за счет:

- упреждающих корректировок управляемых параметров, выполняемых на основании применения метода прогнозирования изменения жесткости формователя;
- рационального выбора параметров пневматической подвески с учетом предложенных критериев;
- выбора пневмоаппаратуры с повышенными параметрами воспроизводимости.

В дальнейшем работа будет направлена на повышение автоматизации в работе стэнда. Предполагается на основе метода прогнозирования изменения жесткости формователя программно оценивать износ формователя, чтобы вовремя выводить на экран оператора сообщение о его замене и блокировать дальнейшую работу стэнда. Также для расширения диапазона параметров стэнда планируется применить пневматическую подвеску с адаптивным автоматическим изменением жесткости пневмопружины.

Библиографический список

1. Гусеница Я. Н., Малахов А. В., Старовойтов Д. И. [и др.]. Моделирование ударной испытательной установки на основе

искусственных нейронных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 506–516.

2. Назилин С. Ударные стенды многократного действия производства фирмы Elstar // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 5. С. 74–75.

3. Popov A. N., Vasiliev A. K., Shtreker D. S., Reshetov D. V., Bryanskiy A. A. Shock machines for testing Arctic robotics // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 539. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012124.

4. Пат. 174534 Российская Федерация, МПК G 01 M 7/08. Стенд для ударных испытаний / Попов А. Н., Пуленец Н. Е., Васильев А. К. № 2017115491; заявл. 02.05.17; опубл. 19.10.17, Бюл. № 29.

5. Vit Babuška, Carl Sisemore. The Science and Engineering of Mechanical Shock. Springer, Cham, 2020. 369 p. DOI: 10.1007/978-3-030-12103-7.

6. Попов А. Н., Полищук М. Н., Васильев А. К. [и др.]. Адаптивный метод управления пневмоприводом стенда многократных ударов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2020. № 9. С. 333–346. DOI: 10.1872/MMF-2020-23.

7. Popov A. N., Polishchuck M. N., Vasilev A. K. Method for producing shock acceleration in mechanical testing // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.) 2020. Vol. 14 (2). P. 105–110. DOI: 10.15866/ireme.v14i2.18204.

8. Попов А. Н., Полищук М. Н., Пуленец Н. Е. Моделирование импульса при ударных испытаниях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2019. № 8. С. 513–526. DOI: 10.1872/MMF-2019-42.

9. Gao T., Liu Q., Ma J. [et al.]. Simulation and Experimental Research on Rubber Waveform Generator // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 667. P. 536–541. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.667.536.

10. Мирошкин К. П. Нелинейное деформирование неоднородных элементов машиностроительных конструкций из резинометаллических материалов с учетом старения: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2007. 158 с.

11. Polishchuck M. N., Popov A. N., Vasiliev A. K., Reshetov D. V. Research of Air Suspension of Shock Machine. MMESE 2020, LNME. 2021. P. 219–230. DOI: 10.1007/978-3-030-62062-2_22.

ВАСИЛЬЕВ Алексей Константинович, аспирант Высшей школы автоматизации и робототехники.

SPIN-код: 2332-8490

AuthorID (РИНЦ): 1108304

ORCID: 0000-0002-0327-9225

AuthorID (SCOPUS): 57217068149

ДБЯЧЕНКО Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Высшей школы автоматизации и робототехники.

SPIN-код: 7808-8824

AuthorID (РИНЦ): 316465

AuthorID (SCOPUS): 57189364100

Адрес для переписки: alex_vasilev9@mail.ru

Для цитирования

Васильев А. К., Дбяченко В. А. Анализ условий и критериев воспроизводимости ударного импульса на мехатронных испытательных стендах // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 41–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-41-45.

Статья поступила в редакцию 08.07.2021 г.

© А. К. Васильев, В. А. Дбяченко