

А.Н. Попов¹, М.Н. Полищук², Д.В. Решетов³

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ СТЕНДЕ ТИПА СМУ500



¹Аркадий Николаевич Попов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)947-3582, E-mail: porka.n@mail.ru



²Михаил Нусимович Полищук,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)242-2526, E-mail: polishchuck@mail.ru



³Дмитрий Валентинович Решетов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (981)876-95-81, E-mail: pvclol@yandex.ru

Аннотация

Дано описание схемного решения универсального стенда с пневмоприводом, предназначенного для проведения испытаний на одиночные и многократные ударные воздействия. Приведены технические характеристики стенда и описан принцип его действия в номинальном режиме работы и при работе с пневматическим ускорителем. Описан адаптивный режим с автоматической подстройкой параметров для воспроизведения заданных пиковых ударных ускорений. Показана предпусковая настройка стенда для центрирования объекта испытаний относительно оси ударного стола. Приведены и описаны экспериментальные графики ударных импульсов ускорения при использовании формирователей из нетканых материалов и квазиупругих полимерных композиций.

Ключевые слова: ударные испытания, универсальный стенд, схемное решение, технические характеристики, экспериментальные данные.

Введение

Первые ударные машины, которые использовались для испытания изделий на ударные нагрузки, были вертикальными [1], вследствие простоты конструктивного решения таких машин. Задача сводилась к подъему испытуемого объекта на определенную высоту, чтобы получить при падении необходимую скорость соударения с формирователем импульса [2]. Для увеличения скорости соударения требуется поднимать объект на большую высоту, что приводит к значительной металлоемкости ударной машины и ее низкой производительности в режиме многократных ударов. В результате появились ударные машины, в которых высокая скорость при соударении реализуется за счет применения ускорителей, основанных на запасании энергии в механических пружинах (рессорах), эластомерных банджах, а в последнее время и в сжатом воздухе [3]. Это позволяет существенно уменьшить габариты машины и повысить ее энергоемкость. Такой подход реализован в эксплуатируемых конструкциях ударных машин: предварительно натянутые пружины используются в стендах ООО ВиброСервисТест [4] и ООО БиТехно (РФ) [5], энергия, запасенная в банджах, – компаниями Lansmont (США) [6] и Elstar Elektronik AG (Швейцария) [7], сжатый воздух – в стендах Avex Electronics Inc. (США) [8], ООО Дельтаэк (РФ) [9].

Методы

В работе рассматривается стенд серии СМУ типа СМУ500 (рис. 1), технические характеристики которого приведены в таблице 1.

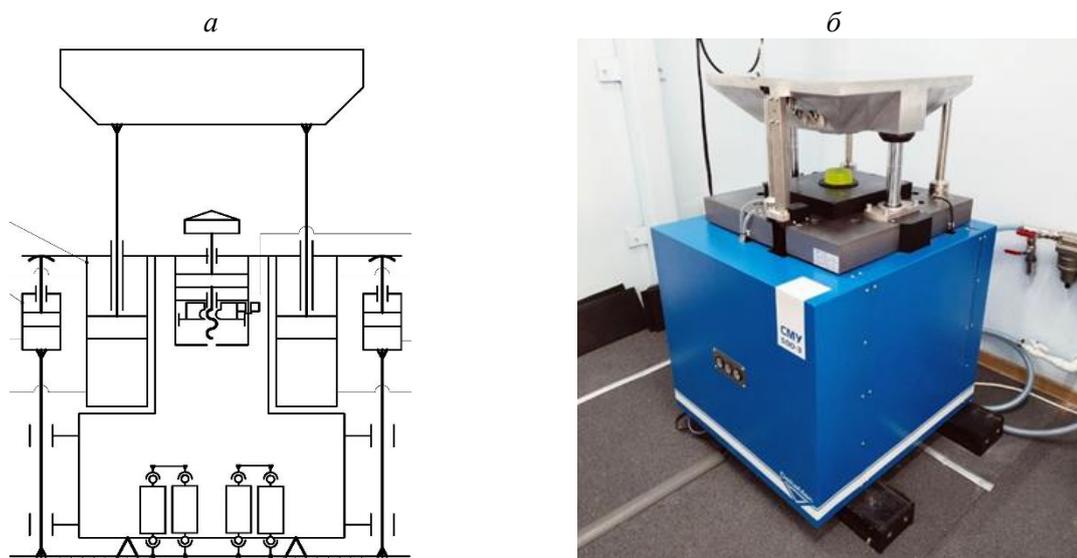


Рис. 1. Ударная машина стенда СМУ500: *а* – схема, *б* – общий вид
1 – ударный стол, 2 – приводной пневмоцилиндр, 3 – направляющая стола, 4 – инерционный блок, 5 – цилиндр пневмоподвески, 6 – гидравлический демпфер, 7 – гнездо для установки формирователей импульса; 8 – направляющая инерционного блока; 9 – подошва

Таблица 1. Технические характеристики стенда СМУ500

Наименование технической характеристики	Наличие требуемой функции или значения параметра
1. Режимы работы стенда: 1.1. Свободное падение ударного стола 1.2. Падение ударного стола с использованием ускорителя 1.3. Одиночный удар 1.4. Многократный удар	– соответствие – соответствие – соответствие – соответствие
2. Скорость ударного стола перед ударом, м/с, не более	3
3. Диапазон воспроизводимых пиковых ударных ускорений A , g	3÷500
4. Диапазон воспроизведения длительностей τ на уровне $0,1 A$, мс	1÷60
5. Погрешность воспроизведения пикового ударного ускорения, %, не более	15
6. Форма ударного импульса	полусинусоидальная, близкая к полусинусоидальной
7. Максимальная частота воспроизводимых ударов, удар/мин	120
8. Масса сборки (испытываемого изделия с технологической оснасткой), m кг, не более	100
9. Размер ударного стола, длина, ширина, мм	590×590
11. Виброизоляция ударной машины: 11.1. Тип виброизоляции 11.2. Схема установки пневмоцилиндров подвески 11.3. Активное управление жесткостью подвески	– пневмогидравлическая – верхняя – соответствие
14. Габаритные размеры ударной машины (длина, ширина, высота), мм, не более	900, 870, 1100
15. Масса ударной машины, кг, не более	2700

Принципы работы пневматических ударных машин описаны в ряде работ [10...12], здесь остановимся на функциональных и конструктивных особенностях стенда СМУ500 и его экспериментальном исследовании.

Для привода ударного стола в машине используются два пневматических цилиндра с усиленными штоками, выполняющими роль направляющих. Использование заводских пневматических цилиндров позволяет обеспечить высокий ресурс привода, который составляет $10 \cdot 10^6$ срабатываний или $5 \cdot 10^3$ км пробега поршня. В качестве датчика обратной связи в приводе используется оптическая кодовая линейка [13] (на рис. 1 не показана). Управление подачей воздуха реализовано на основе быстродействующих пропорциональных регуляторов давления. Функционалом управления является пиковое ударное ускорение,

воспроизводимое на столе, которое считывается вибропреобразователем в каждом цикле срабатывания привода. В зависимости от текущего значения ускорения пропорциональный регулятор изменяет высоту подъема стола путем подачи в рабочую полость цилиндров воздуха в требуемом объеме и с необходимым давлением. Обратная связь по пиковому ударному ускорению обеспечивает автоматический выход стенда на ускорение, заданное оператором на панели стойки управления. Процесс выхода на ускорение происходит итерационно. Пропорциональный регулятор постепенно увеличивает объем воздуха, подаваемый в поршневую полость, до тех пор, пока ускорение не войдет в поле допуска. Выход на режим отображается на мониторе стойки управления.

Как отмечено в таблице 1, стенд может работать как в режиме свободного падения, так и при использовании ускорителя [14]. При включении ускорителя сжатый воздух начинает подаваться и в поршневую полость пневмоцилиндра при подъеме стола и в штоковую полость для дополнительного разгона стола при его падении. Пневматический ускоритель используется в стенде для получения максимальных пиковых ударных ускорений 5000 м/с^2 и более.

При работе ударной машины на таких ускорениях могут возникать значительные реакции в опорах направляющих, вызванные внецентренным ударом. Реакции в опорах создают силы трения, которые, в свою очередь, приводят к износу опор, а в предельном случае к заклиниванию. Высокая частота работы стенда в режиме многократных ударов в условиях внецентренного удара приводит к существенному нагреву направляющих и опор. В связи с этим ряд производителей ударных стендов вводит ограничения по смещению вектора силы тяжести объекта испытаний относительно вертикальной оси ударного стола. Допустимые смещения, как правило, малы и составляют не более нескольких десятков миллиметров. Определить положение центра тяжести на объекте испытаний, если он не указан в сопроводительной документации к испытываемому объекту, обычно непросто. Сложно также совместить воображаемое положение центра тяжести с вертикальной осью стола. Даже при использовании специальных весов для определения центра тяжести перенос объекта испытаний с весов на ударный стол вызовет затруднения при совмещении центра тяжести с осью стола. В связи с этим ударный стенд СМУ500 снабжен тремя датчиками веса, которые в заданных точках опираются на нижнюю не рабочую плоскость ударного стола. Специальное программное обеспечение позволяет на основе показаний датчиков веса с достаточной степенью точности совместить центр тяжести объекта испытаний с осью стола.

На дисплее (рис. 2) стойки управления стенда СМУ500 отображаются датчики веса, зеркало стола, поле допуска и текущее положение центра тяжести в виде перекрестия. Перемещение объекта испытаний в плоскости

стола приводит к смещению положения перекрестия. Совмещение перекрестия с полем допуска дает разрешение на запуск стенда.

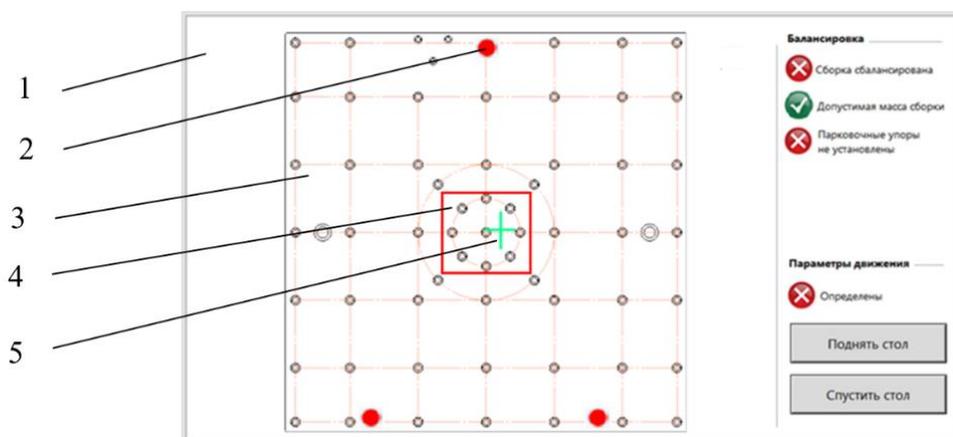


Рис. 2. Окно программы «Центрирование» на стойке управления стендом СМУ500
1 – дисплей; 2 - датчики веса; 3 – зеркало стола; 4 – поле допуска; 5 – текущее положение центра тяжести

Необходимой частью ударного стенда является инерционный блок (ИБ), который за счет своей массы уменьшает динамическое воздействие на цеховой пол. При выборе массы ИБ учитывалась динамика удара двух тел разной массы: ИБ и ударного стола. Известно [15], что важнейшим параметром, который характеризует энергетические характеристики ударных стендов, является энергия удара, в частности, скорость стола перед ударом. Для стенда СМУ500 она составляет 3 м/с. При выборе массы ИБ в расчет принималась зависимость, связывающая массы соударяемых тел и скорость их взаимодействия, определяемая соотношением [15]:

$$v = \frac{m + M}{M} \cdot \frac{A\tau}{\pi - 2\arcsin(0,1)}, \quad (1)$$

где m – масса каретки с объектом испытаний; M – масса ИБ; τ – длительность ударного импульса; A – пиковое значение ударного импульса.

Приведенная формула «хорошо работает» в случае одиночного удара. Когда стенд является универсальным и позволяет воспроизводить как одиночные, так и многократные удары, необходимо дополнительно учитывать колебания ИБ после удара. Колебательность ИБ СМУ500 обусловлена пневмогидравлической подвеской. Оптимальный выбор параметров подвески: жесткости пневматических цилиндров 5, свойств и количества гидравлических демпферов 6 (см. рис. 1) при фиксированной массе ИБ позволил довести размах колебаний ИБ с учетом их затухания до величины, которая позволила на каждом ударе обеспечить требуемую точность по пиковому ударному ускорению.

Воспроизводимое стендом ускорение меняется от удара к удару из-за большого количества случайных факторов, влияющих на его текущее значение. Среди них: непостоянство трения в опорах скольжения направляющих приводных цилиндров, в опорах цилиндров пневмоподвески, штоках демпферов; колебания давления в пневмосети; нелинейная характеристика пропорционального преобразователя давления; непостоянство времени срабатывания распределителей; колебательность ИБ. При критическом сочетании случайных факторов могут наблюдаться выбросы. Однако опыт эксплуатации машин (подобных СМУ500) показал, что при правильном подборе параметров и оптимальной настройке количество выбросов по пиковому ударному ускорению не превышает 3 % на ста ударах.

Применение пневматической подвески и гидравлических демпферов в ударных стендах описано в ряде работ [2, 11, 16]. Отличием конструкции стенда СМУ500 от предыдущих разработок [9] является переход от рукавных и баллонных пневмоцилиндров подвески к классическим цилиндрическим. Такой переход обусловлен доступностью и более низкой стоимостью подобных пневмоцилиндров. Второе преимущество цилиндров – возможность изменения их жесткости путем соединения или отключения их рабочих полостей с дополнительными объемами. Мягкая подвеска ИБ СМУ500 характерна для режимов одиночного удара, когда можно реализовать большой ход подвески и это не повлияет на ускорение при повторном ударе. Большой ход ИБ в этом случае способствует интенсивному поглощению энергии удара гидравлическими демпферами и снижением динамического воздействия на цеховой пол или фундамент. Жесткая подвеска в стенде СМУ500 реализуется для режима многократных ударов.

Место установки пневмоцилиндров подвески и амортизаторов важно для устойчивой работы ударных стендов и предотвращения боковой раскачки ИБ. Предпочтительной является верхняя установка, когда подвеска и демпферы устанавливаются по уровню выше уровня положения центра масс ИБ. В стенде СМУ500 реализован промежуточный вариант: пневмоподвеска имеет верхнюю установку, а демпферы расположены на уровне центра масс ИБ.

Еще одной особенностью стенда СМУ500 является универсальность с точки зрения применяемых формирователей ударных импульсов. Как известно [3, 12, 17...20], материал и размеры формирователей, являются определяющими для значения длительности ударного импульса. Наличие гнезда 7 (см. рис. 1) позволяет устанавливать на ИБ стопки формирователей, которые взаимодействуют с бойком на ударной поверхности стола. На наковальню, закрывающую гнездо (на рис. 1 не показана), можно устанавливать до пяти формирователей, которые работают параллельно. На стенде СМУ500 используются различные

формирователи: комплекты из полиуретановых формирователей разной геометрии и жесткости, комплект формирователей из сополимера полиэтилентерефталата, формирователи из нетканых материалов трех типов, комплект эластомерных формирователей и, наконец, формирователь на основе пневмоцилиндра с регулируемой жесткостью.

Чтобы получить на стенде значительную длительность ударного импульса, нужно увеличить время деформирования формирователя. Из формулы (1) видно, что произведение пикового ударного ускорения на длительность импульса пропорционально скорости стола перед ударом. Таким образом, при большой длительности можно получить невысокие ускорения, а на больших ускорениях только малую длительность. Скриншоты характерных импульсов, воспроизводимых на стенде СМУ500 в режиме многократных ударов, представлены на рис. 3-6. Эти импульсы получены на формирователях из различных материалов.

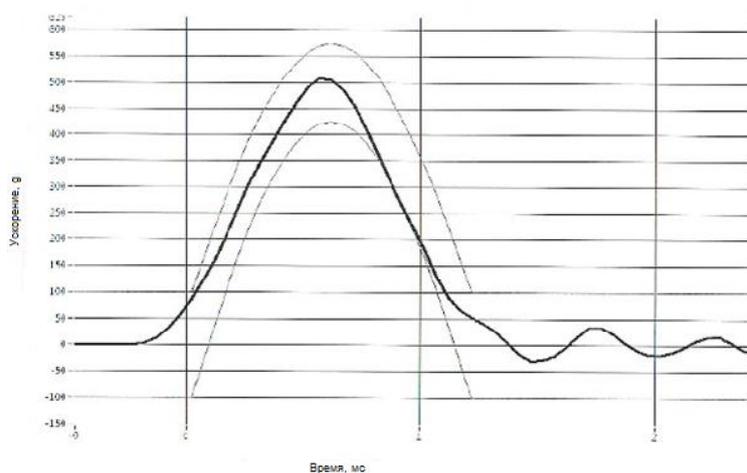


Рис. 3. Импульс с пиковым ударным ускорением 500 g и длительностью 1 мс (на сополимере полиэтилентерефталата и нетканого материала)

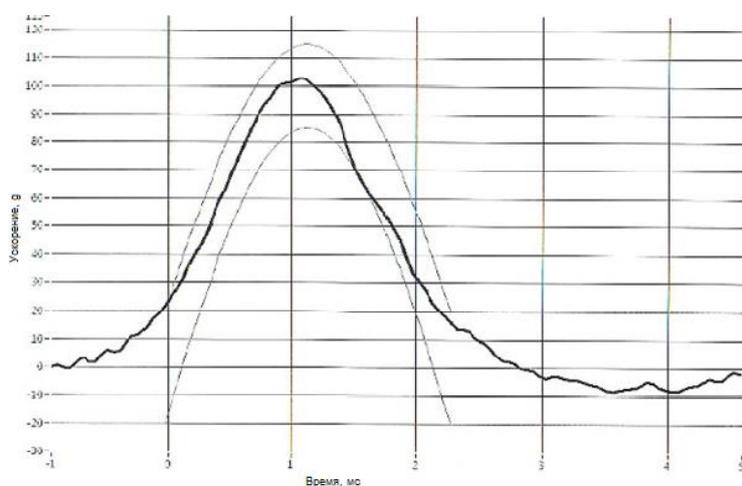


Рис. 4. Импульс с пиковым ударным ускорением 100 g и длительностью 3 мс (на формирователе, изготовленном на основе полиуретановой композиции)

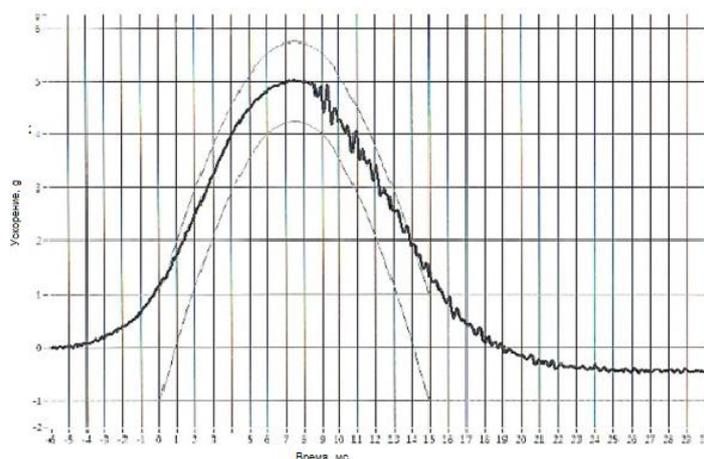


Рис. 5. Импульс с пиковым ударным ускорением 5 g и длительностью 13 мс (на формователе, изготовленном на основе полиуретановой композиции)

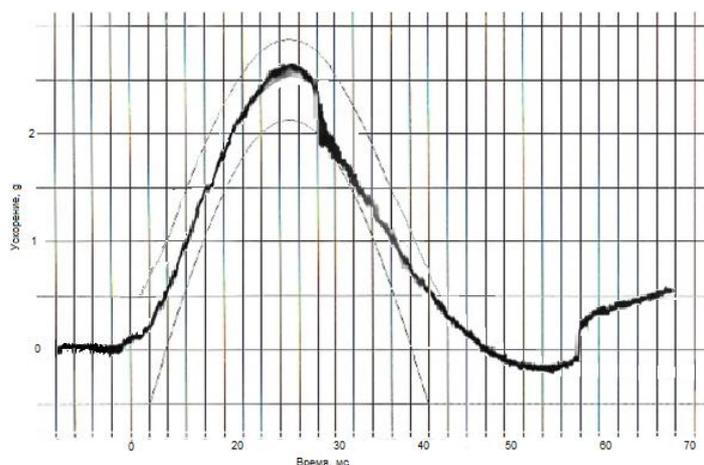


Рис. 6. Импульс с пиковым ударным ускорением 2,3 g и длительностью 54 мс (на эластомерном формователе)

Результаты

Проанализировано схемное решение пневматического ударного стенда типа СМУ500. Показаны и обоснованы конструктивные особенности стенда, которые позволяют выполнять одиночные и многократные удары с заданными параметрами (пиковым ударным ускорением и длительностью) и полусинусоидальной формой. Рассмотрены различные режимы работы стенда: подготовительный для центрирования объекта испытаний на ударном столе, одиночного удара при мягкой пневматической подвеске, многократного удара при жесткой пневматической подвеске и режим работы с максимальной энергией удара при использовании пневматического ускорителя. Описаны основные случайные факторы, которые приводят к выходу пикового ударного ускорения из зоны поля допуска. Приведен процент выбросов для стенда

СМУ500. Сделаны оценки ресурса пневматического привода, исходя из данных компании поставщика пневматических цилиндров.

Обсуждение

Конструкция ударного стенда СМУ500 является результатом совершенствования линейки ударных стендов серии СМУ. Улучшение его характеристик обеспечено и конструктивно (переносом опор пневмоподвески и опор демпферов), и программно (за счет предварительного центрирования объекта испытаний посредством трех датчиков веса). Опробование формирователей импульса из разных материалов позволяет оптимальным образом подойти к вопросу их выбора по критерию «стойкость формирователя – цена формирователя» при ограничении на количество ударов в серии.

Заключение

В статье приведены технические характеристики и описана конструкция универсального пневматического ударного стенда типа СМУ500. Представлены скриншоты типовых импульсов, воспроизводимых на стенде. На следующем этапе работы можно перейти к определению предельных характеристик ударного стенда по пиковым ударным ускорениям и частоте следования ударов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Christian Lalanne. Mechanical Shock: monograf. ISTE Ltd and John Wiley&Sons Inc, 2009. – 367 p.
- [2] Vit Babuška, Carl Sisemore. The Science and Engineering of Mechanical Shock – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 369 p.
- [3] Каразин В.И., Хлебосолов И.О., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Андриенко П.А., Терешин В.А., Хисамов А.В. Методы и средства лабораторного воспроизведения ускорения. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023, 168 с.
- [4] Производство испытательного оборудования. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vstest.ru>. (Дата обращения: 10.04.2024).
- [5] Испытательное оборудование для промышленных предприятий. [Электронный ресурс]. URL: <http://be-tehno.tilda>. (Дата обращения: 10.04.2024).
- [6] Производители испытательного оборудования. [Электронный ресурс]. URL: <https://testpartner.ru/library/lansmont/> (Дата обращения: 10.04.2024).

- [7] Shock / Drop & Vibration Testing. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elstar.com/products/mechanical-shock-vibration-testing.html> (Дата обращения: 10.04.2024).
- [8] Ударные стенды сверхвысоких ускорений ВМ (США) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.avxelectronics.com>. (Дата обращения: 10.04.2024).
- [9] Стенды для механических испытаний: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deltamec.ru>. (Дата обращения: 10.04.2024).
- [10] Yi T., Jin C., Hong J., Liu Y. Layout analysis of compressed air and hydraulic energy storage systems for vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022. – 14(1), pp. 1-19.
- [11] Harris C.M., Piersol A.G. *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. 1457 p.
- [12] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2021)*, LNME, 2022, pp. 86–96.
- [13] Попов А.Н., Полищук М.Н., Тимофеев А.Н. Датчики технологических машин. Учебное пособие. СПбПУ, 2012, 130 с.
- [14] Popov A.N., Polishchuck M.N., Reshetov D.V. Pneumatic Accelerator of the Mechatronic Shock Machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2022)*, LNME, 2023, pp. 120-131.
- [15] Popov A.N., Polishchuck M.N., Reshetov D.V. Horizontal Bump Machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2023)*, LNME, 2023, pp. 133-145.
- [16] Polishchuck M.N., Popov A.N., Vasiliev A.K., Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2020)*, LNME, 2021, pp. 219-230.
- [17] Xiaoqiu Xu, Junwei Han, Dacheng Cong, Shutao Zheng. High-power impact experimental generation analysis using hydraulic impact simulation tester. *IEEE 3rd Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*, 2019. pp. 2098-2102.
- [18] Jingjing Wen, Chengwu Liu, Houpu Yao, Bin Wu. A nonlinear dynamic model and parameters identification method for predicting the shock pulse of rubber waveform generator. *International Journal of Impact Engineering*. 2018, 120. pp. 1–15.
- [19] Tae-Ho Yang, Young-Shin Lee, Yoon-Jae Kim, Tae-Hyeong Kim, Chang-Won Shul, Myung-Seog Yang, Chae-Hun An, Gyu-Sub Lee. A Study on Dynamic Characteristics of Hyper-elastic Shock Programmer with Truncated Conical Shape. *Advanced Materials Research*, 2014, 871. PP. 240-246.
- [20] Sujuan Jiao, Yu Wang, Lei Zhang, Hongxing Hua. Shock wave characteristics of a hydraulic damper for shock test machine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010. pp. 1570-1578.

SHOCK SIMULATION ON A UNIVERSAL VERTICAL MACHINE SMU500 SERIES

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

A description is given of the scheme design of a universal shock machine with a pneumatic actuator, designed for testing single and multiple shocks. The technical characteristics of the machine are given and the principle of its operation in the nominal operating mode and working with a pneumatic accelerator is described. An adaptive mode with automatic adjustment of parameters to reproduce specified peak shock accelerations is described. The pre-launch setup of the machine for centering the test object relative to the axis of the shock table is shown. Experimental graphs of shock acceleration using shapers made of nonwoven materials and quasi-elastic polymer compositions are presented and described.

Key words: shock tests, universal shock machine, scheme design, technical characteristics, experimental data.

REFERENCES

- [1] Christian Lalanne. Mechanical Shock: monograf. ISTE Ltd and John Wiley&Sons Inc, 2009. – 367 p.
- [2] Vit Babuška, Carl Sisemore. The Science and Engineering of Mechanical Shock – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 369 p.
- [3] Karazin V.I., Khlebosolov I.O., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Andrienko P.A., Tereshin V.A., Khisamov A.V. Methods and means of laboratory reproduction of acceleration. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2023, 168 p.
- [4] Manufacturing of testing equipment. [Electronic resource]. URL: <https://www.vstest.ru>. (Accessed: 10.04.2024).
- [5] Website of Test equipment for industrial plants. [Electronic resource]. URL: <http://be-tehno.tilda>. (Accessed: 10.04.2024).
- [6] Manufacturing of testing equipment. [Electronic resource]. URL: <https://testpartner.ru/library/lansmont/> (Accessed: 10.04.2024).
- [7] Shock / Drop & Vibration Testing. [Electronic resource]. URL: <https://www.elstar.com/products/mechanical-shock-vibration-testing.html> (Accessed: 10.04.2024).

- [8] Ultra-high acceleration shock test machines BM (USA) [Electronic resource]. URL: <https://www.avexelectronics.com>. (Accessed: 10.04.2024).
- [9] Стенды для механических испытаний: [Electronic resource]. URL: <https://www.deltamec.ru>. (Accessed: 10.04.2024).
- [10] Yi T., Jin C., Hong J., Liu Y. Layout analysis of compressed air and hydraulic energy storage systems for vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022. – 14(1), pp. 1-19.
- [11] Harris C.M., Piersol A.G. *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. 1457 p.
- [12] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2021)*, LNME, 2022, pp. 86–96.
- [13] Popov A.N., Polishchuk M.N., Timofeev A.N. Sensors for technological machines. Tutorial. SPbPU, 2012, 130 p.
- [14] Popov A.N., Polishchuck M.N., Reshetov D.V. Pneumatic Accelerator of the Mechatronic Shock Machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2022)*, LNME, 2023, pp. 120-131.
- [15] Popov A.N., Polishchuck M.N., Reshetov D.V. Horizontal Bump Machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2023)*, LNME, 2023, pp. 133-145.
- [16] Polishchuck M.N., Popov A.N., Vasiliev A.K., Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. *Advances in Mechanical Engineering (MMESE2020)*, LNME, 2021, pp. 219-230.
- [17] Xiaoqiu Xu, Junwei Han, Dacheng Cong, Shutao Zheng. High-power impact experimental generation analysis using hydraulic impact simulation tester. *IEEE 3rd Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*, 2019. pp. 2098-2102.
- [18] Jingjing Wen, Chengwu Liu, Houpu Yao, Bin Wu. A nonlinear dynamic model and parameters identification method for predicting the shock pulse of rubber waveform generator. *International Journal of Impact Engineering*. 2018, 120. pp. 1–15.
- [19] Tae-Ho Yang, Young-Shin Lee, Yoon-Jae Kim, Tae-Hyeong Kim, Chang-Won Shul, Myung-Seog Yang, Chae-Hun An, Gyu-Sub Lee. A Study on Dynamic Characteristics of Hyper-elastic Shock Programmer with Truncated Conical Shape. *Advanced Materials Research*, 2014, 871. PP. 240-246.
- [20] Sujuan Jiao, Yu Wang, Lei Zhang, Hongxing Hua. Shock wave characteristics of a hydraulic damper for shock test machine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010. pp. 1570-1578