

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Васильев Алексей Константинович

**Разработка и исследование испытательных стендов
многократных ударов**

Направление подготовки

15.06.01 «Машиностроение»

Код и наименование

Направленность

15.06.01_03 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:

Васильев Алексей Константинович

Научный руководитель:

Владимир Алексеевич Дьяченко,
профессор, доктор технических наук

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой:

*Мацко Ольга Николаевна,
кандидат технических наук*

Научный руководитель:

*Владимир Алексеевич Дьяченко,
профессор, доктор технических
наук*

Рецензент:

*Иван Сергеевич Знаменский
кандидат технических наук
руководитель продаж в
Европейской части РФ ООО
«ФЕСТО-РФ»*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Испытания на воздействия окружающей среды – неотъемлемая часть жизненного цикла любого изделия. Окружающая среда часто оказывает негативное действие на изделие, сокращая срок его службы и приводя к внезапным поломкам. Самыми опасными, наряду с климатическими, являются механические воздействия: вибрация, многократные и одиночные удары, длительное действие центробежных сил и др. В настоящее время для проверки работоспособности изделий в условиях внешней среды применяются испытательные мехатронные стенды. На отечественных предприятиях особенно востребованы испытания на многократные удары, что подтверждается многочисленными запросами промышленности на разработку и изготовление стендов многократных ударов.

Требования к параметрам испытаний на воздействие многократных ударов содержит соответствующая типу испытуемого изделия регламентирующая документация. С увеличением сложности устройства изделий, связанной с развитием военной и гражданской промышленности, растут требования к испытаниям, а, следовательно, и к ударным стендам. Из-за этого становятся актуальными исследования и разработка стендов многократных ударов с новыми функциональными свойствами, такими как высокое быстродействие и воспроизводимость, наличие автоматических настройки, контроля и поддержания параметров ударных испытаний.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка высокоавтоматизированных испытательных стендов многократных ударов нового типа с мехатронным приводом и системой управления, их экспериментально-теоретические исследования и разработка методики их использования.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Анализ и сравнение отечественных и зарубежных стандартов в области испытаний на многократный удар, выявление достоинств и недостатков известного оборудования для воспроизведения многократных ударов.
2. Формирование требований к современному мехатронному ударному стенду и предложений по построению стенда на основе анализа стандартов испытаний и известного оборудования.
3. Обоснование и разработка мехатронного привода стенда и его системы управления, обеспечивающих высокую степень автоматизации стенда.
4. Разработка математической модели стенда и определение на её основе диапазона сочетаний функциональных параметров стенда, а также разработка алгоритма автоматической настройки и поддержания пикового ударного ускорения.

5. Исследование условий и критериев стабильного воспроизведения параметров ударного импульса методом компьютерного моделирования, получение предложений по расширению диапазона функциональных параметров стенда.

6. Создание и экспериментальные исследования мехатронных стендов многократных ударов, апробация предложенных принципов построения и разработанного алгоритма настройки стендов. Разработка методики использования созданных стендов.

Научная новизна

1. Предложен новый (патент RU 174 534 U1) принцип построения пневматического привода и системы управления мехатронного стенда многократных ударов. Он отличается от известных тем, что между источником сжатого воздуха и каждым приводным цилиндром установлены последовательно электрорегулятор давления и распределитель. Регулятор и распределитель управляется контроллером, который получает информацию о текущих параметрах ударного импульса от интегрированного в стенд акселерометра. Предложенный принцип позволяет реализовать автоматическую настройку, контроль и поддержание функциональных параметров стенда, а также увеличить частоту следования ударов по сравнению с известными решениями.

2. С помощью созданной математической модели стенда обосновано устройство его нового привода. Выявлен и проанализирован диапазон сочетаний функциональных параметров стенда с новым приводом. Полученные математические зависимости являются частью методического обеспечения при разработке новых стендов.

3. Предложены критерии выбора параметров пневматической подвески стенда, метод прогнозирования параметров импульсов ускорения и метод оценки влияния воспроизводимости параметров привода на стабильность ударного импульса. Применение предложенных методов и критериев позволяет расширить диапазон сочетаний функциональных параметров стенда.

4. Предложен новый вид рабочей диаграммы мехатронных стендов (working area), отличающийся от известных тем, что на диаграмме указана максимальная частота следования ударов. Указанная диаграмма построена при использовании имитатора изделия. Такая диаграмма позволяет более полно оценить применимость и эффективность созданных стендов.

Теоретическая и практическая значимость

Создана серия мехатронных стендов многократных ударов, позволяющая испытывать по отечественным стандартам изделия массой до 1200 кг. Разработан новый мехатронный пневматический привод стенда. Разработан и применен алгоритм автоматической настройки стенда, позволяющий сократить время на подготовку к испытаниям в несколько раз. Разработано методическое руководство по использованию созданных стендов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 6-я, 8-я и 9-я международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение: Наука и образование ММЕSE» (Санкт-Петербург, 2017, 2019, 2020), научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» в 2018, 2019 и 2020 годах, научная конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021».

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования представлены в 14-и научных публикациях. Из них 3 статьи входят в международную базу данных SCOPUS. Одна статья входит в перечень журналов, рекомендованных ВАК, а остальные 9 – в базу данных РИНЦ.

Представление научного доклада: основные положения

1. Принцип построения мехатронного пневматического привода и системы управления станда многократных ударов.
2. Метод и результаты теоретической оценки диапазонов и сочетаний функциональных и управляемых параметров станда с новым приводом.
3. Алгоритм автоматической настройки управляемых параметров привода и автоматического поддержания параметров испытаний.
4. Критерии выбора параметров подвески станда многократных ударов.
5. Метод прогнозирования параметров импульсов ускорения, основанный на экспериментальных данных.
6. Метод оценки влияния воспроизводимости параметров привода на стабильность ударного импульса.
7. Рабочие диаграммы созданных стандов, подтверждающие корректность предложенного принципа построения стандов.
8. Методика использования созданных стандов многократных ударов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, а также научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Основной материал диссертации распределен по четырем главам.

В главе 1 приведена и проанализирована проблематика разработки стандов многократных ударов. Рассмотрены известные подходы к решению обозначенных проблем и выявлены возможные направления для новых исследований.

Далее в главе проводится анализ отечественных и зарубежных стандартов в области испытаний на воздействие многократных ударов. Отмечено, что отечественные стандарты предъявляют более жесткие

требования к параметрам испытаний чем зарубежные стандарты. По результату анализа стандартов разработана диаграмма типовых параметров испытаний (рисунок 1). Эта диаграмма позволяет сформулировать требования к вновь разрабатываемым стендам многократных ударов. Её также можно использовать для оценки качества и соответствия стандартам имеющегося оборудования.

Рассмотрены и проанализированы различные конструктивные схемы известных стендов многократных ударов. Выявлено, что стенды многократных ударов с пневматическим приводом по своим функциональным параметрам наиболее соответствуют диаграмме, изображенной на рисунке 1. Под функциональными параметрами стенда понимается длительность τ (мс) и пиковое значение ускорения A (g) импульса, частота следования ударов f (уд/мин).

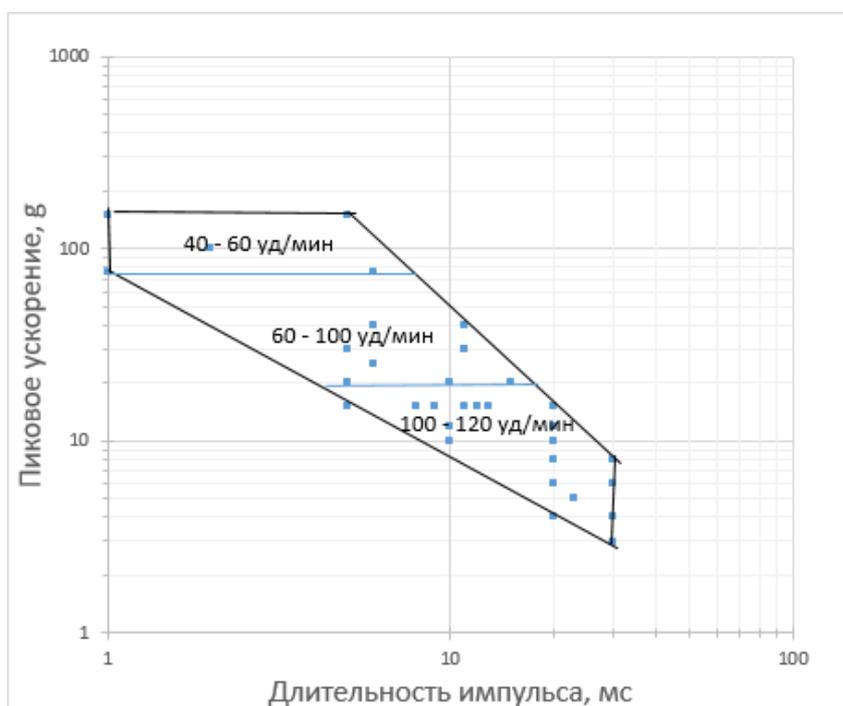


Рисунок 1. Диаграмма типовых параметров

Отмечено недостаточное количество стендов грузоподъемностью выше 100 кг, способных работать с частотой следования ударов до 120 уд/мин. Также наблюдается недостаточное количество стендов грузоподъемностью выше 200 кг, в которых достигают величины пикового ускорения 150 g.

В выводах главы формулируются задачи научных исследований, представленных в диссертации.

Во второй главе на основе анализа известного оборудования и запросов отечественных предприятий выделены основные требования к современному мехатронному стенду многократных ударов. Предложено конструктивное решение и принцип построения стенда многократных ударов, удовлетворяющего выделенным требованиям. На рисунке 2 представлена пневмокинематическая схема, на которой показано устройство стенда и его пневматического привода.

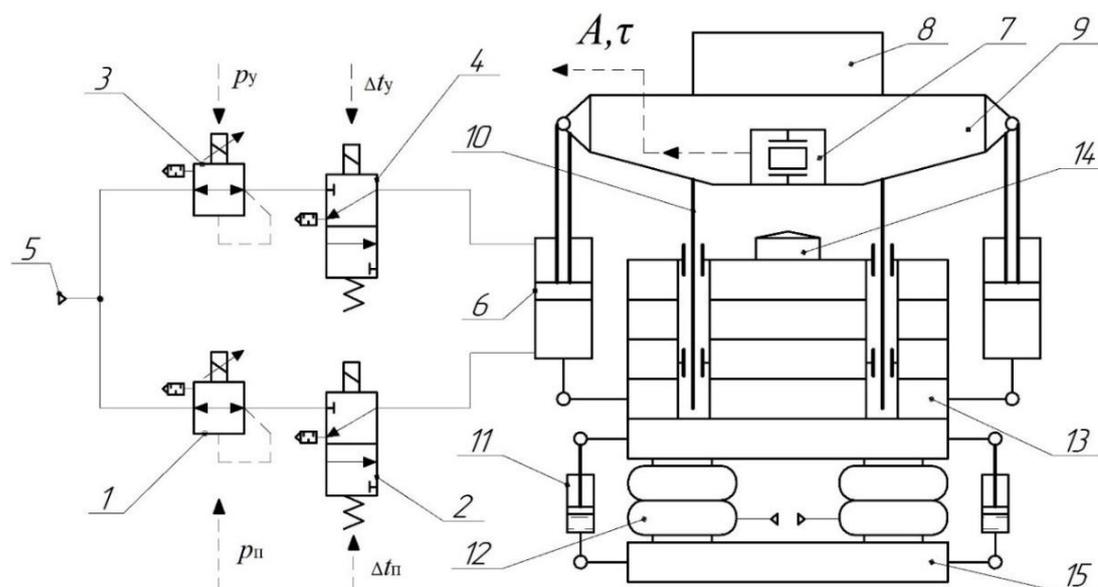


Рисунок 2. Пневмокинематическая схема ударного стенда

Изделие 8 закреплено на подвижной платформе 9, которую приводят в движение пневматические цилиндры 6. Пневмоцилиндры соединены с пневмомагистралью 5 коммутирующей аппаратурой: электрорегуляторами давления 1 и 3 для поршневых и штоковых полостей цилиндров; распределителями 2 и 4. В подвижную платформу интегрирован акселерометр 7. Платформа имеет поступательные направляющие 10. Стенд имеет массивный инерционный блок 13 и пневматическую подвеску, состоящую из амортизаторов 11 и пневмоцилиндров 12. На верхнюю часть инерционного блока установлен формирователь импульса 14. Подошва 15 крепится к цеховому полу с помощью анкерных болтов.

Ударный импульс возникает вследствие торможения формирователем движущейся платформы с изделием. Импульс характеризуется пиковым значением ускорения, формой и длительностью. Пиковое значение зависит от скорости соударения платформы и формирователя, а также от жесткости формирователя. Длительность и форма импульса зависят от формирователя.

Скоростью соударения платформы и формирователя можно управлять с помощью изменения параметров: давления воздуха, подаваемого в поршневые полости $p_{п}$; давления воздуха, подаваемого в штоковые полости $p_{у}$; длительности подачи воздуха в поршневые полости $\Delta t_{п}$; длительности подачи воздуха в штоковые полости $\Delta t_{у}$. С помощью параметров $p_{п}$ и $\Delta t_{п}$ регулируется высота подъема платформы, а параметры $p_{у}$ и $\Delta t_{у}$ позволяют регулировать дополнительное ускорение платформы при движении вниз (включать ускоритель).

В главе предложен новый принцип построения мехатронного пневматического привода и системы управления стенда. Предложенные решения защищены патентом RU 174 534 U1. Принцип работы системы управления заключается в следующем. В платформу встроен акселерометр, который фиксирует ударный импульс. Акселерометр интегрирован в систему

управления стенда. Сигнал акселерометра обрабатывает и анализирует контроллер. Контроллер сравнивает параметры импульса ускорения, полученного с акселерометра, с уставкой – параметрами импульса, которые задал оператор. По результату сравнения контроллер корректирует управляемые параметры привода – p_n и Δt_n , p_y и Δt_y . Процесс настройки параметров привода происходит циклично: параметры корректируются после каждого удара в зависимости от полученного пикового ускорения в предыдущем ударе. Параметры для первого удара вычисляются по аналитическим зависимостям, полученным при анализе математической модели стенда.

Разработана и экспериментально апробирована математическая модель стенда. На основе математической модели предложен способ оценки диапазона функциональных и управляемых параметров стенда.

Цель оценки диапазона – проверка корректности выбора конструктивных параметров стенда посредством сравнения результатов оценки и требований технического задания, технических условий и программы испытаний. К конструктивным параметрам можно отнести, например, диаметр поршня, ход и количество пневматических цилиндров, массу платформы и др.

С учетом допущения о том, что жесткость формователя ss_ϕ не зависит от величины его деформации, найдены зависимости при выключенном ускорителе $AA(pp_n, \Delta tt_n)$ и $ff(pp_n, \Delta tt_n)$, а также при включенном – $A\phi pp_n, \Delta tt_n, pp_y, \Delta tt_y$ и $f\phi pp_n, \Delta tt_n, pp_y, \Delta tt_y$. Для оценки диапазона сочетаний управляемых и функциональных параметров предложены и построены диаграммы линий уровня найденных зависимостей. Диаграмма линий уровня функции пикового ускорения и частоты следования ударов при работе стенда с выключенным ускорителем представлена на рисунке 3. Пунктирными линиями обозначена максимальная частота следования ударов, сплошными – пиковое ударное ускорение.

Пунктирные линии отсекают возможные сочетания управляемых параметров для получения требуемого пикового ускорения при требуемой частоте следования ударов. Например, для стенда СМУ 400 максимальное пиковое значение при частоте следования ударов 2 Гц равно 12 g, а частоты 1,2 Гц можно добиться при любых параметрах. При максимальном пиковом значении ускорения равном 48 g возможная частота следования ударов равна 1,4 Гц. При условии, что установлен формователь, позволяющий получить длительность $\tau=10$ мс.

Далее показано, что наличие ускорителя позволяет увеличить пиковое ударное ускорение в 2 раза при том же ходе цилиндра, а также увеличить частоту следования ударов на 20%. Диаграмма линий уровня функции пикового ускорения и частоты при включенном ускорителе показана на рисунке 4.

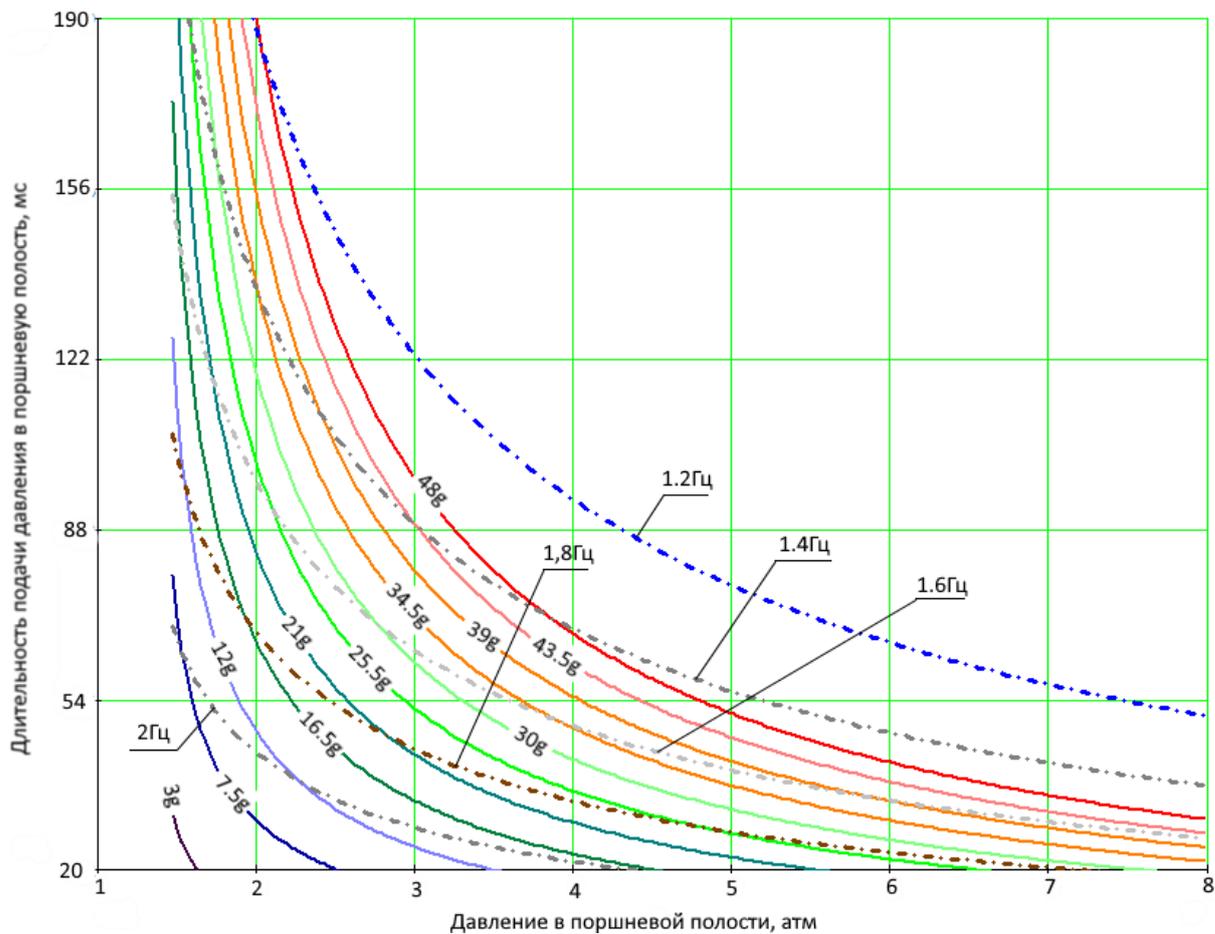


Рисунок 3. Диаграмма линий уровня функции пикового ускорения и частоты при выключенном ускорителе

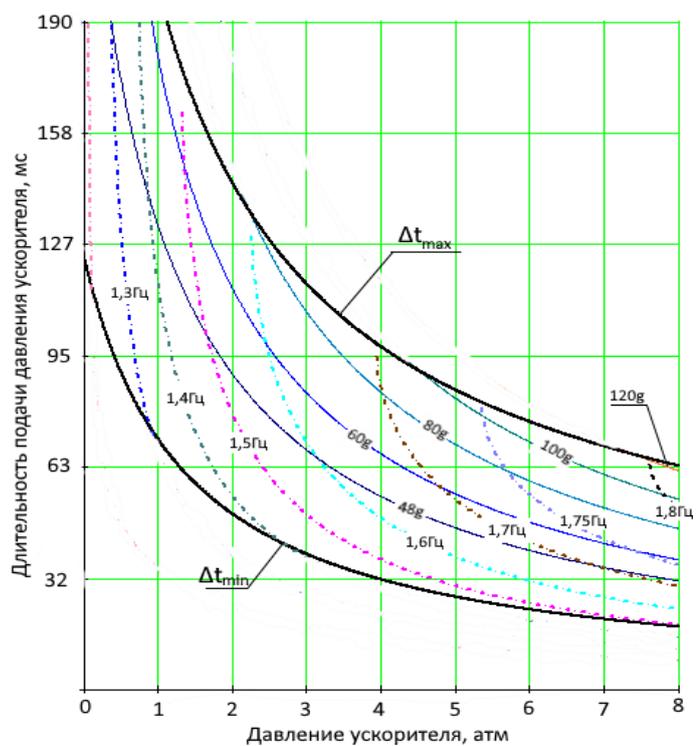


Рисунок 4. Диаграмма линий уровня функции пикового ускорения и частоты при включенном ускорителе

Справа от границы рациональнее настраивать пиковое ускорение давлением, слева – длительностью подачи воздуха. Также эта граница условно разделяет области с близкими к горизонтали и вертикали участками линий уровня функций чувствительности, где рациональнее всего выполнять линейную экстраполяцию в ходе настройки одним из управляющих параметров. Показано, что существуют диапазоны, в которых настройка давлением рациональнее чем настройка временем подачи воздуха. Таким образом, обосновано устройство предлагаемого привода.

На основе найденных при математическом моделировании аналитических зависимостей предложен алгоритм автоматической настройки параметров привода. Этот алгоритм применяется с целью получения и поддержания требуемого пикового значения ускорения при заданной формирователем длительности импульса и заданной оператором частоты следования ударов.

В третьей главе проводится поиск условий стабильного воспроизведения ударного импульса: возможности выполнять большое количество ударов подряд без выхода параметров ударного импульса за пределы допуска.

Выделено два вида неустойчивости воспроизведения параметров ударного импульса: разброс пиковых значений ускорения импульса из-за разброса значения скорости соударения, а также уход за пределы допуска среднего значения пикового ускорения из-за изменения свойств формирователя в процессе работы.

Установлено, чтобы корректно учесть уход среднего значения пикового ускорения из-за изменения свойств формирователя, необходимо учитывать, что реальное значение жесткости формирователя зависит от его деформации. Для этого применены и адаптированы известные методы прогнозирования параметров импульса ускорения: метод интегрирования экспериментальной зависимости $A(t)$ (далее метод 1) и метод конечных элементов (метод 2). Показано, что метод 2 ближе к экспериментальным данным, а также более трудоемкий.

Даны рекомендации по применимости методов:

- Метод 1 можно применять для уточнения оценок диапазонов функциональных параметров при проектировании новых ударных стендов с использованием уже разработанных комплектов формирователей.

- Метод 2 можно применять при проектировании новых комплектов формирователей.

Показано, что характеристика силы упругости формирователя с увеличением количества ударов меняет свой вид. На основе методов 1 и 2 предложен новый экспериментально-теоретический метод прогнозирования изменения характеристики силы упругости формирователя. Зная о том, как меняется характеристика силы упругости формирователя, можно определить, как изменятся параметры ударного импульса. На рисунке 7 и 8 приведено сравнение тенденции «ухода» средних значений пикового ускорения и

длительности импульса, найденного с помощью предложенного метода и эксперимента.

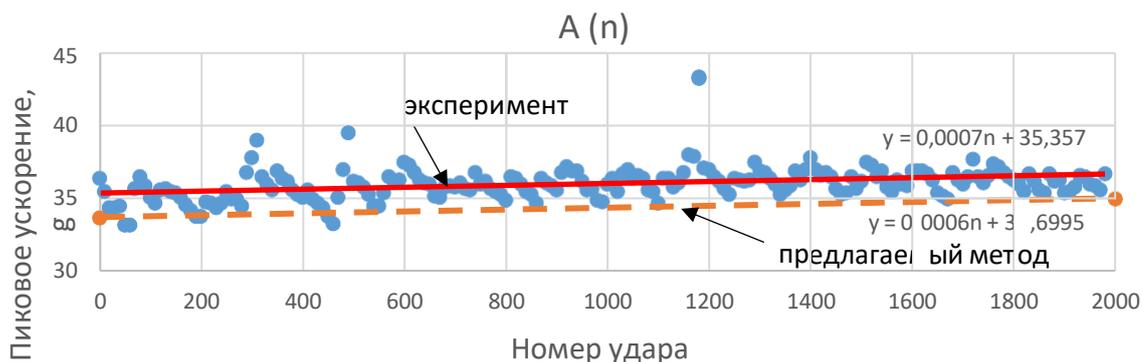


Рисунок 7. Зависимость пикового ускорения от номера удара

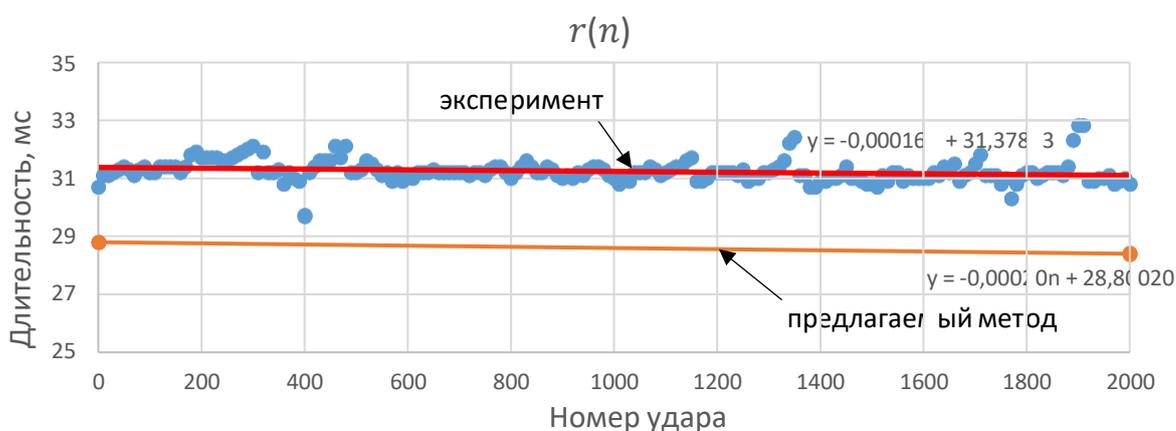


Рисунок 8. Зависимость длительности импульса от номера удара

Предложено практическое применение метода прогнозирования изменения параметров импульса. Метод можно применять для определения степени износа формирователя, а также для упреждающего внесения корректировок в управляемые параметры.

Найдена причина разброса скорости соударения платформы и формирователя. Она заключается в том, что после удара возникают колебания инерционного блока на пневматической подвеске. При этом каждый следующий цикл удара начинается при новых начальных условиях. Выделено два основных критерия выбора параметров пневматической подвески стенда с учетом необходимости повышения стабильности импульса и выполнения подвеской своей основной функции:

- Скорость инерционного блока к моменту начала нового цикла удара должна быть равна нулю или близка к нулю.

- При работе стенда максимальное динамическое усилие на пол помещения, в котором установлен стенд, не должно превышать допустимое.

Создана математическая модель подвески стенда и на её основе предложена компьютерная модель, которая позволяет итерационно выбирать параметры подвески. Предложена методика подбора параметров подвески. Она основана на том, что при выборе параметров необязательно рассматривать все режимы испытаний: достаточно выбрать режим с

наибольшим значением произведения $A \cdot t$. Компьютерное моделирование показало, что такой режим вызывает наибольшую длительность колебаний инерционного блока (рисунок 9) и наибольшее динамическое усилие на пол помещения.

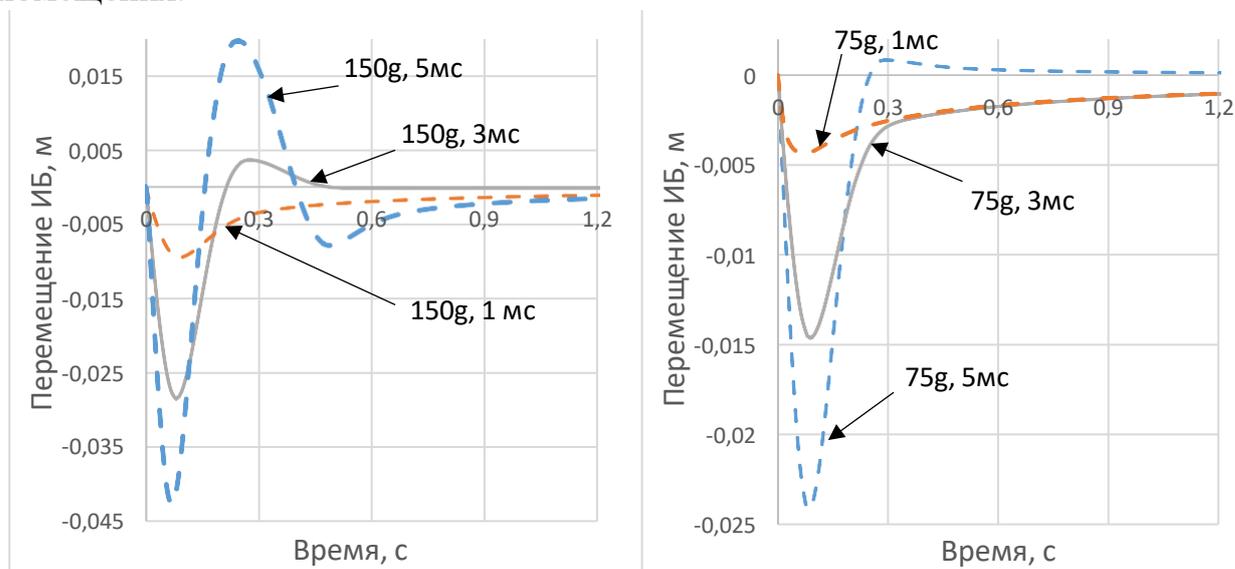


Рисунок 9. Перемещение инерционного блока для характерных режимов испытаний

Далее найдена другая причина разброса скорости соударения платформы и формирователя – 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:

$$\Delta A = \frac{A(p_{\text{п}} \pm W_A, \Delta t_{\text{п}} \pm W_{tt})}{A(p_{\text{п}}, \Delta t_{\text{п}})} \cdot 100\% - 100\%,$$

где W_{AA} – воспроизводимость давления, которая зависит от типа электропневматического регулятора, W_{tt} – воспроизводимость длительности включения распределителя, для большинства распределителей равна ± 1 мс.

Показано (рисунок 10), что с увеличением пикового ускорения отклонение уменьшается, а также что воспроизводимость длительности включения распределителя влияет на отклонение не так существенно как воспроизводимость давления и не превышает 5%.

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

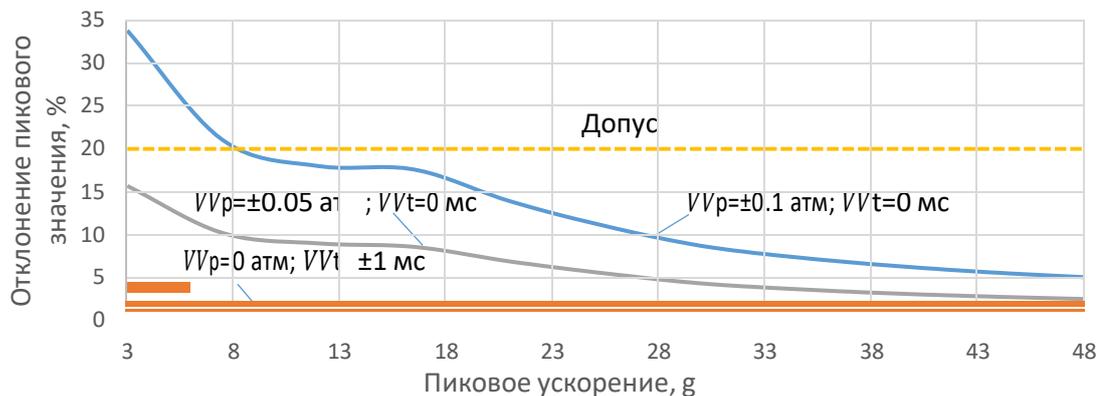


Рисунок 10. Зависимость отклонения ΔA от пикового значения ускорения

Четвертая глава содержит описание результатов разработки стендов многократных ударов серии СМУ (рисунок 11), в создании которой автор принимал непосредственное участие. Приведено техническое описание устройства стендов серии СМУ.



СМУ400-4 (СП6)



СМУ1200-2,5 (Челябинск)



СМУ2000-1 (СП6)



Стойка управления стендами

Рисунок 11. Фотографии созданных стендов серии СМУ

Автором предложен новый вид рабочей диаграммы (working area), отличающийся от известного вида тем, что на диаграмме указана максимальная частота следования ударов, а также тем, что диаграмма построена при использовании имитатора изделия (рисунок 12). Эти диаграммы могут быть полезны для заказчиков стендов, так как они позволяют достаточно полно оценить эффективность и применимость стендов.

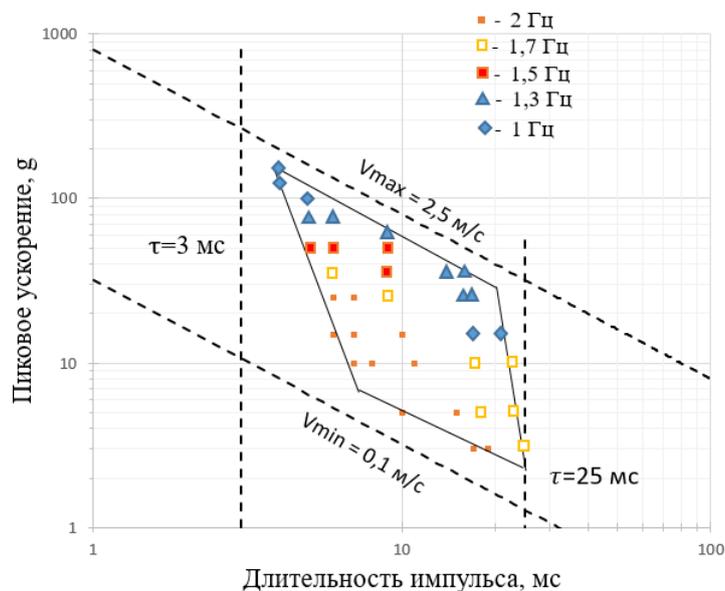


Рисунок 12. Рабочая диаграмма стенда СМУ1200-2,5

Анализ рабочих диаграмм созданных стендов подтверждает, что сочетания функциональных параметров соответствуют техническим заданиям. Указанное соответствие подтверждается полученным актом о внедрении.

Далее представлена методика использования стендов серии СМУ при проведении испытаний, которая отличается от методики использования традиционных стендов следующим:

- автоматическое взвешивание и контроль положения центра масс изделия;
- встроенная измерительная система, которая не требует подключения и настройки;
- настройка стенда автоматическая;
- чтобы начать испытания, оператору необходимо ввести требуемые сочетания функциональных параметров в разработанный интерфейс.

В соответствии с методикой использования стендов разработан интерфейс оператора с возможностью визуального контроля параметров испытаний, их записи и архивирования.

Заключение

1. Рассмотрены и проанализированы отечественные и зарубежные стандарты в области многократных ударных испытаний. По результату анализа разработана диаграмма типовых параметров, которая может быть

использована для оценки эффективности существующего и вновь разрабатываемого оборудования. Сопоставление функциональных параметров известных стендов многократных ударов с разработанной диаграммой позволило обосновать выбор конструктивного решения стенда многократных ударов. Анализ принципов построения известных стендов позволил выявить требования к создаваемому современному мехатронному стенду многократных ударов.

2. Предложен новый принцип построения привода и системы управления мехатронного стенда многократных ударов. Новый принцип позволяет реализовать автоматическую настройку, поддержание и контроль функциональных параметров стенда, а также увеличить частоту следования ударов по сравнению с известными решениями. Разработана и исследована математическая модель стенда с новым приводом, на основе которой предложен способ оценки диапазона функциональных параметров стенда и разработан алгоритм автоматической настройки управляемых параметров.

3. Получены и реализованы рекомендации по увеличению стабильности воспроизведения ударных импульсов. Рекомендации заключаются в выборе параметров пневматической подвески стенда по найденным критериям, введении упреждающих корректировок управляемых параметров для компенсации эффекта старения материала формователей, а также в выборе пневмоаппаратуры с повышенными параметрами воспроизводимости. Выполнение предложенных рекомендаций позволяет расширить диапазон функциональных параметров нового стенда.

4. С участием автора создана и аттестована серия мехатронных стенов многократных ударов нового типа. Многочисленные эксперименты, проведенные на этих стендах, подтверждают корректность предложенных решений и методов по разработке стенда. Разработана новая методика использования созданных стенов, которая значительно упрощает работу оператора стенда и сокращает время на подготовку к испытаниям.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Васильев А. К., Дьяченко 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.

2. Mikhail N. Polishchuck, Arkadii N. Popov, Alexey K. Vasiliev, Dmitrii V. Reshetov. Research of Air Suspension of Shock Machine. MMESE 2020, LNME, pp. 219–230, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62062-2_22

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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/539/1/012124>

4. Arkadii N. Popov, Mikhail N. Polishchuck, Alexey K. Vasilev. Method for producing shock acceleration in mechanical testing. International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 14, n. 2. - 2020 - pp 105-110
<https://doi.org/10.15866/ireme.v14i2.18204>

Публикации в других изданиях

5. Пат. 174534 Российская Федерация, МПК G 01 М 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.

6. Дьяченко В.А., Полищук М. Н., Васильев А.К., Штрекер Д.С. Исследование и разработка ударных машин // Машиностроение: новые концепции и технологии. – Красноярск, 2020. – С.229-233

7. Брянский А.А., Васильев А.К., Попов А.Н. Анализ сигнала ударного акселерометра // научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы. – СПб, 2020. –С.3–5.

8. Полищук М.Н., Попов А.Н., Васильев А.К., Решетов Д.В. Моделирование пневматической подвески ударной машины// Современное машиностроение. Наука и образование. № 9. 2020 – С. 359-372.

9. Попов А. Н. Компьютерное моделирование удара в стендах многократных ударов/ А. Н. Попов, А. К. Васильев, А. А. Брянский, Д. В. Решетов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2020. –№9.– С.347-358.

10. Попов А. Н., Полищук М.Н., Васильев А.К., Брянский А.А. Адаптивный метод управления пневмоприводом стенда многократных ударов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2020. –№9.– С.333-346.

11. Брянский А.А., Васильев А.К., Попов А.Н. Управление пневмоприводом ударного стенда // научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы, лучшие доклады. – СПб, 2019. –С.124–129.

12. Попов А.Н, Полищук М.Н., Пуленец Н.Е, Васильев А. К. Экспериментальные исследования ударной машины lansmont // Современное машиностроение. Наука и образование. № 8. 2019 – С. 527-538.

13. Попов А.Н., Васильев А.К.// Выбор оптимальной конструкции стола ударного стенда// материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 2018, С9-11.

14. Попов А.Н., Полищук М.Н., Пуленец Н.Е., Васильев А.К. Алгоритм наладки пневматических ударных стендов. Современное машиностроение: Наука и образование. № 6. 2017. С. 503-514

Аспирант _____ ФИО

(подпись)