

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 53.082

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ

© 2023 г. Ф. А. Белолуцкий^а, Т. В. Казиева^а, А. А. Морозов^а, В. Н. Решетов^{б, *}, М. В. Решетова^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^бГНЦ РФ ТИСНУМ, Москва, 108840 Россия

*E-mail: nreshetov@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2022 г.

После доработки 22.07.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

Рассмотрена система регистрации импульсного силового воздействия, состоящая из баллистического маятника и датчиков перемещения, силы, ускорения и акустической эмиссии. Проведен анализ амплитудно-частотных и импульсных характеристик измерительных каналов и представлены результаты испытания модельных систем. Установлены конструктивные и аппаратные ограничения на временное разрешение гибридной системы регистрации воздействия газовой струи. Показана возможность регистрации динамических составляющих силы воздействия с временным разрешением не хуже 100 мкс и порогом по силе 0.1 Н при использовании серийных пьезокерамических датчиков.

Ключевые слова: анализ динамических характеристик, АЧХ, измерение тяги, ловители газовой струи, метрология, плазменные двигатели, силовое воздействие газовой струи, системы регистрации силового воздействия

DOI: 10.56304/S2079562922050062

ВВЕДЕНИЕ

Задача анализа силового воздействия газовой или жидкой струи на твердую преграду встречается в самых разных областях человеческой деятельности. Наиболее яркими примерами такого взаимодействия могут служить системы гидроабразивной резки металлов [1] и приборы для измерения внутриглазного давления [2]. Данное исследование было инициировано работами по созданию нового поколения плазменных двигателей для космических аппаратов. Прототипы таких двигателей испытываются в вакуумных камерах и работают в импульсных режимах. Классические системы измерения тяги, используемые при огневых испытаниях жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей, в данном случае плохо применимы, поскольку импульсы тяги, создаваемые плазменными двигателями, и вызываемая ими “реакция опоры” малы в сравнении с весом двигателя и аппаратуры, обеспечивающей его функционирование [3, 4].

Особый интерес при разработке плазменных двигателей с электромагнитным способом формирования газовой струи представляет внутренняя динамика газового разряда и его разного рода неустойчивости [5]. Традиционные баллистические схемы с ловителями газовой струи, используемые для измерения полного импульса силы, в

данном случае не решают всех поставленных задач, поскольку информация о тонкой временной структуре газовой струи в них полностью теряется [6]. Возможным путем решения задачи по изучению динамических характеристик тяги такого типа плазменных двигателей может быть создание внешних по отношению к двигателю гибридных систем измерения тяги типа ловителя газовой струи, сочетающих в себе достоинства баллистических, тензометрических, сейсмометрических и акустических методов регистрации силового воздействия.

АНАЛИЗ ПРЕДЛАГАЕМОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

Схематическое изображение гибридного измерителя силы воздействия газовой струи представлено на рис. 1. Инертная масса баллистического маятника разбита на две части, m_1 и m_2 , соединенные между собой тремя датчиками силы, расположенными по кругу. При этом k_1 — это жесткость пружинного подвеса маятника в целом, а k_2 — суммарная жесткость датчиков силы, соединяющих m_1 и m_2 . Датчик ускорения размещен на ловителе газовой струи массой m_2 и позволяет измерять высокочастотные составляющие силы воздействия. Датчик акустической эмиссии смонтирован в конус ловителя газовой струи.

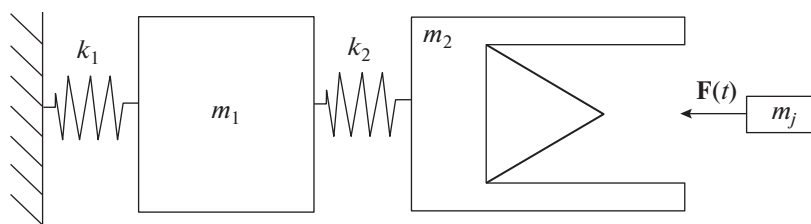


Рис. 1. Блок-схема гибридного баллистического маятника.

Колебания маятника предлагается измерять лазерным триангуляционным датчиком типа РФ603HS X/100, фиксирующим линейные перемещения объекта с частотой 70 кГц и разрешением 10 мкм в диапазоне 50 мм, что в пересчете на скорость линейного перемещения позволит получить точность измерения переданного маятнику импульса $\sim 1\%$ в диапазоне скоростей его движения от 50 м/с и ниже.

Поскольку период ($T_1 = 1/f_1$) резонансных колебаний инертной массы системы регистрации много больше длительности импульса силы, то есть выполняются условия баллистичности маятника, то в диапазоне частот от f_1 до f_2 датчики силы измеряют силу воздействия газовой струи, умноженную на $m_1/(m_1 + m_2)$. Резонансная частота f_2 отвечает собственным колебаниям двух масс m_1 и m_2 , соединенных датчиками силы с суммарной жесткостью k_2 . Если $m_1 > m_2 \gg m_s$, где m_s — эффективная масса датчика, то резонансная частота f_2 будет в $(m_2/m_s)^{0.5}$ раз меньше паспортного значения резонансной частоты датчика силы. При использовании трех датчиков силы PCB Piezotronics 208C05 с жесткостью 10^9 Н/м и массе ловителя газовой струи 3 кг резонансная частота f_2 будет примерно 5 кГц. Плоский участок амплитудно-частотной характеристики датчика силы будет находиться между f_1 и f_2 с явно выраженными резонансами на этих частотах. Высокая добротность механических резонансов данного канала будет искажать спектр пульсаций силы, и для корректного анализа данных нужны экспериментальные исследования переходной или импульсной характеристики, а также АЧХ и ФЧХ данного измерительного канала [7].

Данный канал достаточно информативен в плане изучения временной зависимости силы воздействия, поскольку его АЧХ начинается с единиц герц (f_1) и простирается до единиц килогерц (f_2). Ниже и выше этих частот АЧХ спадает. Влияние частоты свободных колебаний маятника f_1 на регистрацию быстрых колебаний силового воздействия будет несущественно. Частота f_2 и добротность данного резонанса, напротив, будут крайне важны при анализе зарегистрированных сигналов.

Согласно теории автоматического регулирования оптимальной в плане быстродействия будет система с добротностью близкой к единице, склонная к аperiодическому переходному процессу с небольшим перерегулированием. Одним из способов демпфирования колебаний могут быть локальные вставки из вязкоупругого резиноподобного материала между m_1 и m_2 , эффективно переводящие продольные колебания в сдвиговые, которые хорошо гасятся такого рода средами. Минимально обнаружимое усилие системой из трех датчиков такого типа будет порядка 0.2 Н в полной рабочей полосе частот.

Канал регистрации, ассоциированный с трехкоординатным акселерометром, установленным на первичной массе m_2 ловителя силы, имеет сложную АЧХ, состоящую из двух плоских участков [7]. На частотах ниже f_2 измеряемое им ускорение следует относить к общей массе ($m_1 + m_2$), выше f_2 — к m_2 . Резонанс f_2 , как и собственная резонансная частота датчика f_a , внесут соответствующие коррективы в его отклик. В высокочастотной области кроме собственного резонанса акселерометра f_a будут проявляться резонансы элементов конструкции, и поэтому крайне важно, чтобы они отсутствовали или имели собственные частоты существенно выше частот пульсаций силового воздействия. Требования к добротности резонанса на f_2 для данного канала совпадают с требованиями силоизмерительного канала, оптимальный вариант — критическое демпфирование.

Для акселерометрического канала идеальной является монолитная конструкция инертной массы баллистического маятника, максимально повышающая все возможные механические резонансы, кроме частоты свободных колебаний маятника. При использовании акселерометра AP1080 ГлобалТест рабочий диапазон частот данного измерительного канала гибридной системы регистрации будет от 0.5 Гц до 20 кГц. Минимально обнаружимое ускорение для этого датчика порядка 10 мм/с² в полной рабочей полосе частот, что при общей массе маятника 10 кг эквивалентно силе 0.1 Н.

Если бы конструкция измерительной системы представляла собой протяженный объект с плоской границей, а налетающий газовый поток был

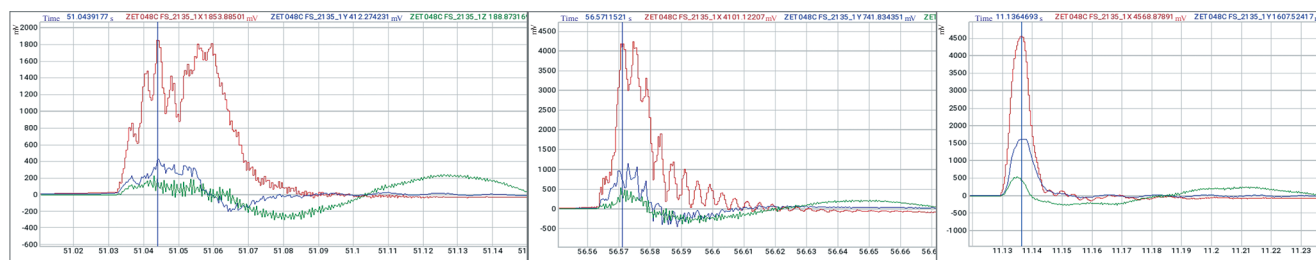


Рис. 2. Примеры зарегистрированных трехкоординатным сейсмоприемником сигналов при воздействии протяженных мягких объектов. Бросок происходил по оси X.

однороден по срезу сопла двигателя и ему не надо бы было растекаться вдоль поверхности ловителя, то хорошей системой регистрации неоднородности плотности и скорости потока был бы плоский датчик акустической эмиссии, регистрирующий звуковую волну, вызванную пульсациями давления в газовой струе. Датчики акустической эмиссии относятся к приборам, реагирующим на колебательную скорость продольной акустической волны, и они имеют чувствительность $S_v \sim (100-1000) \text{ В/(м/с)}$. Учитывая значение акустического импеданса стали, из которой изготовлен ловитель струи, $P/v = \rho c = 46 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ для звукового давления, получаем чувствительность $S_p \sim (2-20) \text{ мкВ/Па}$. Такого типа датчики, как правило, являются высокочастотными, и их основная резонансная частота f_c находится в диапазоне от сотен кГц до единиц МГц. При этом АЧХ датчика имеет достаточно сложный вид и содержит множество резонансов, обусловленных системой крепления и свойствами объекта, на котором установлен датчик.

Еще одним путем измерения силы давления струи через генерируемые ей звуковые волны могло бы быть использование заполненной жидкостью или силиконом полости в ловители струи и размещение в ней гидрофона для регистрации флуктуаций давления. При размере полости $\sim 5 \text{ см}$ первая резонансная частота такой системы будет $\sim 50 \text{ кГц}$. Частотный диапазон малогабаритных гидрофонов может превышать сотни кГц, разрешение по давлению в полной полосе не хуже 0.1 Па .

ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИЛЫ ТЯГИ

Были собраны и испытаны три упрощенные системы регистрации импульсного воздействия. Первая состояла из трехкоординатного сейсмоприемника ZET 048-C, подвешенного в виде маятника. Импульсное воздействие имитировалось путем бросания в сейсмоприемник мягких протяженных объектов. Скорость броска и протяженность объекта выбирались исходя из данных о ре-

зонансной частоте сейсмоприемника и элементов его внешнего корпуса, а также максимальной частоты оцифровки встроенного в него аналого-цифрового преобразователя. Зарегистрированные ускорения по всем трем направлениям колебаний для различных по длительности и характеру воздействий представлены на рис. 2.

Зависимость вида сигнала от характера воздействия не вызывает никаких сомнений. Однако наличие в записях резонансных компонент и отсутствие высокочастотных составляющих указывает на определенные ограничения в плане возможности регистрации пульсаций давления газовой струи таким типом датчика. Полученные данные однозначно указывают на две важные вещи:

- сейсмоприемник, установленный на инертной массе, корректно измеряет ее ускорение, а значит, и силу в рабочей полосе частот;
- импульсные воздействия, основная энергия которых находится вне рабочей полосы сейсмоприемника, не могут быть корректно восстановлены по зарегистрированным сигналам.

Для регистрации более быстрых воздействий и фиксации короткого удара была собрана установка на основе геофона и системы записи в виде аудиорекодера с частотой дискретизации 44.1 кГц . Для сейсмоприемника эта частота была равна всего 2.5 кГц , что налагало известные ограничения на временное разрешение данного канала [7]. Примеры зарегистрированных геофоном сигналов представлены на рис. 3.

Отличительной особенностью используемого геофона является высокая резонансная частота (около 5 кГц) и низкая добротность используемого пьезоэлемента. Это достигается путем его вклейки в монолитный резиновый корпус, демпфирующий резонансные колебания. Система гашения резонансов является важной частью рассматриваемой гибридной системы регистрации силы тяги плазменного двигателя, поскольку при импульсном режиме работы именно резонансный отклик будет самой продолжительной и трудно интерпретируемой частью регистрируемого сигнала.

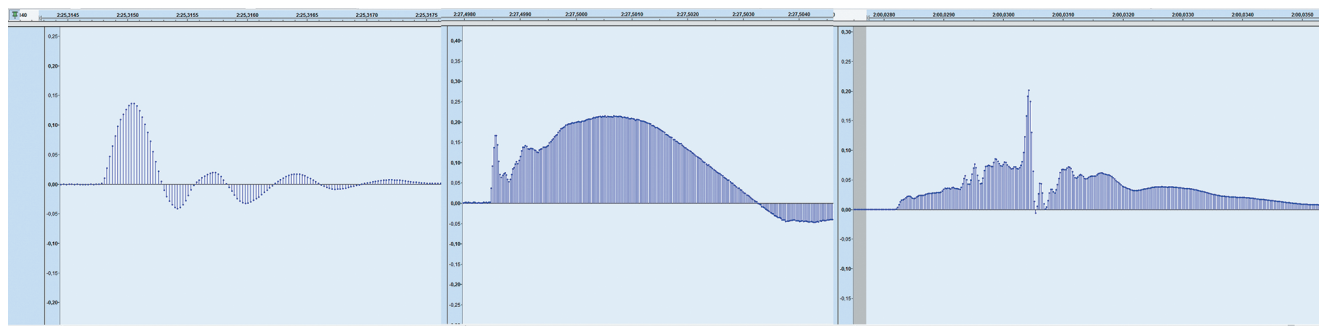


Рис. 3. Примеры зарегистрированных геофоном сигналов при частоте дискретизации 44.1 кГц и воздействии в виде удара резиновым шариком и твердым предметом.

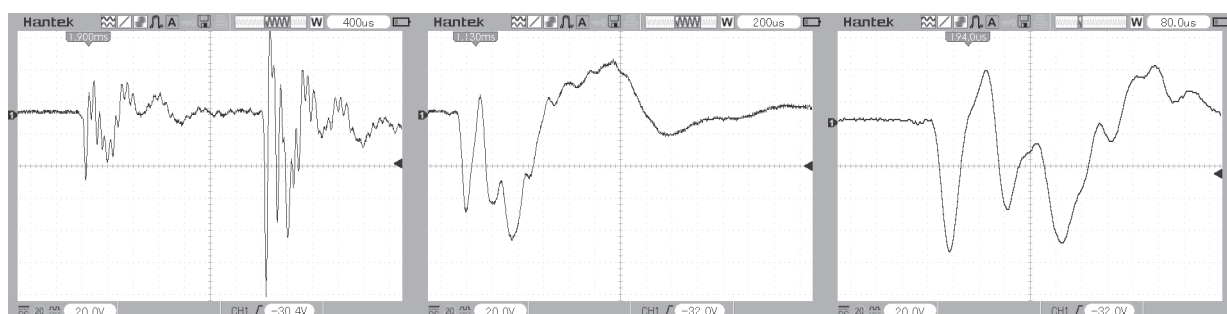


Рис. 4. Примеры сигналов с геофоном, зарегистрированных цифровым осциллографом Hantek DSO1072E при выстреле в пластилиновый ловитель.

Для имитации кратковременного импульсного воздействия использовался пневматический пистолет. При выстреле пулькой массой 0.3 г, летящей со скоростью 100 м/с в пластилиновый ловитель, установленный на геофон, при общем импульсе силы 0.03 Н с, реальная сила удара достигала 1000 Н, поскольку тормозной путь был не более 5 мм. Соответственно длительность силового воздействия была порядка 50 мкс. Примеры записи такого рода воздействия на геофон представлены на рис. 4.

Имитация силового воздействия осуществлялась путем выстрела в упор из пневматического пистолета в кусок пластилина, находившийся на торцевой поверхности геофона. Для исследования временного разрешения осуществлялись выстрелы дуплетом из двух пистолетов. Пример регистрации такого воздействия представлен на рис. 4. Если на левой осциллограмме силовое воздействие от разных выстрелов четко разграничено, то на средней их разделение затруднено, поскольку вторая пулька прилетела в тот момент, когда колебательные процессы, вызванные первым выстрелом, еще не затухли. Для данного типа регистратора в качестве оценки временного разрешения можно принять величину 2 мс, хотя два воздействия, разделенные по времени на 0.5 мс, явно различимы в структуре регистрируемого сигнала.

Единичный выстрел, представленный на правой осциллограмме, указывает на наличие в спектре собственных частот геофона нескольких составляющих, находящихся в диапазоне частот от 2 кГц до 10 кГц. Основная резонансная частота пьезоэлектрического датчика близка к 5 кГц, и длительность фронта регистрируемого сигнала 50 мкс соответствует четверти периода именно этого резонанса.

При регистрации ударов молоточком по разным частям подошвы геофона и бросков резинового шарика крутизна фронта была существенно ниже, и это означает, что он правильно регистрировал такое силовое воздействие (рис. 5).

Особенно характерна картина силового воздействия при ударе молотком по пластилину. На рис. 6 представлены удары плоской и клиновидной частью молотка (соответственно — левая и правая осциллограммы). Хорошо видны этапы пластической деформации материала и упругой реакции. Время нарастания фронта сигнала получилось 0.5 мс, что с учетом данных по выстрелу говорит о том, что это правильная оценка времени нарастания силы взаимодействия. Беря глубину вмятины ~ 1 мм и скорость удара ~ 2 м/с, получаем близкое оценочное значение ~ 1 мс.

Третьей модельной системой был малогабаритный датчик акустической эмиссии. Он был

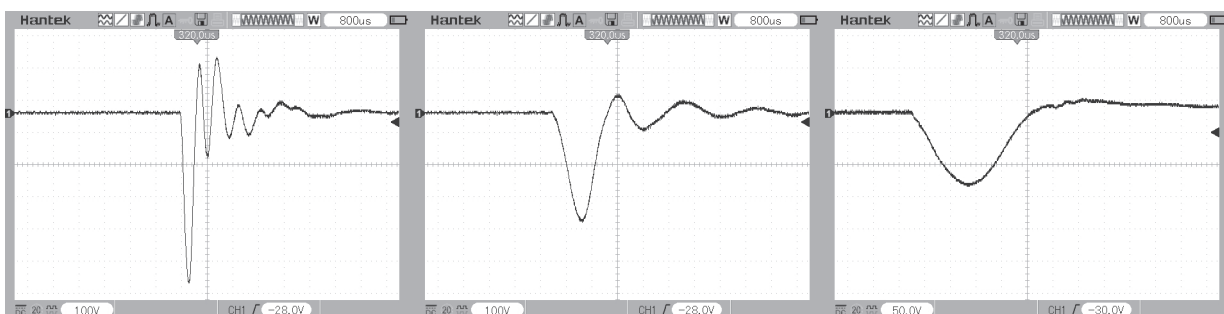


Рис. 5. Примеры сигналов с геофона, зарегистрированных цифровым осциллографом Hantek DSO1072E при ударе молоточком по разным частям подошвы геофона и броске резинового шарика.

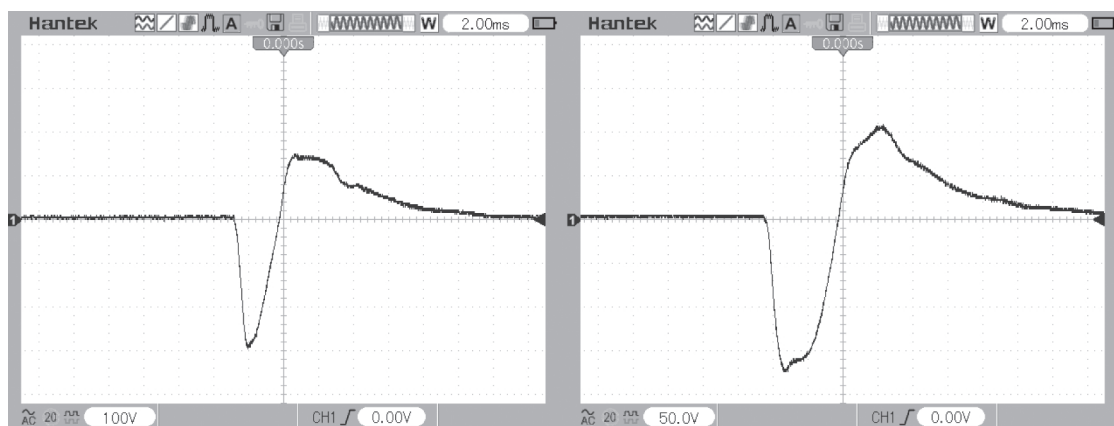


Рис. 6. Примеры сигналов с геофона, зарегистрированных цифровым осциллографом Hantek DSO1072E при ударе молотком в пластиновый ловитель, установленный на геофон.

вмурован в пластилин. В слой пластилина толщиной около 5 мм, находившийся на рабочей поверхности датчика, осуществлялись единичные выстрелы из пневматического пистолета облегченными пластмассовыми пулями, тормозной

путь которых не превышал 3 мм. Примеры зарегистрированных сигналов с разным временным разрешением представлены на рис. 7.

По сигналам хорошо видно, что характерные резонансные частоты данного канала регистра-

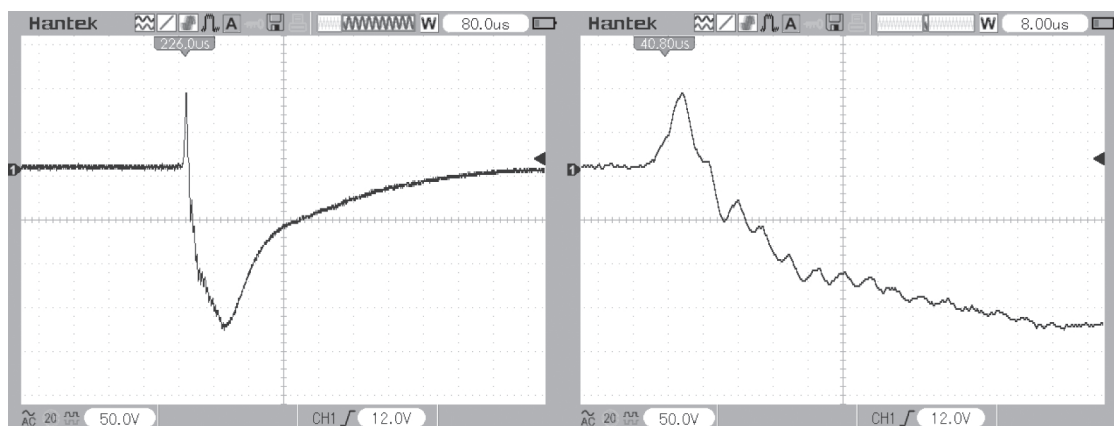


Рис. 7. Пример сигнала с датчика акустической эмиссии, зарегистрированного цифровым осциллографом Hantek DSO1072E при выстреле в пластиновый ловитель.

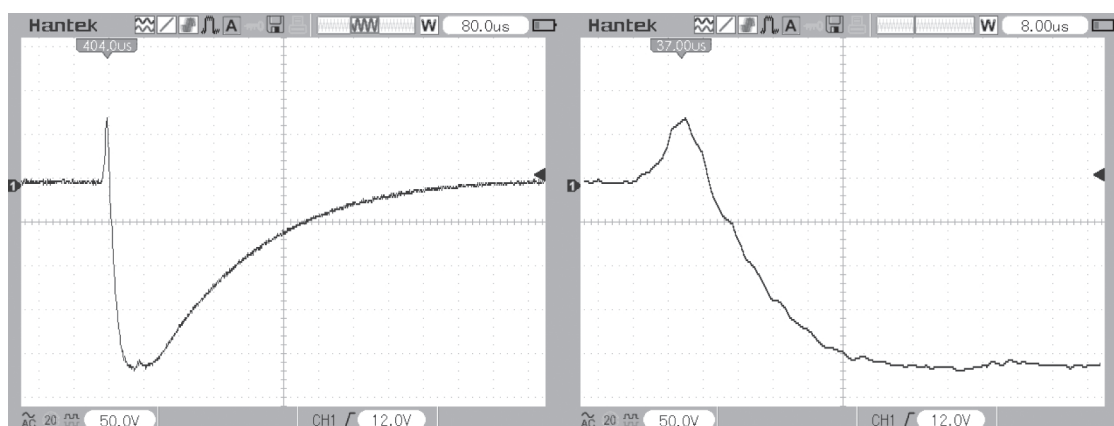


Рис. 8. Пример сигнала с датчика акустической эмиссии, зарегистрированного цифровым осциллографом Hantek DSO1072E при выстреле в пластилиновый ловитель.

ции находятся выше 100 кГц. Частота наблюдаемых осцилляций примерно 150 кГц, что близко к паспортному значению резонансной частоты датчика. Наблюдаемый сигнал достаточно корректно отражает силу, тормозящую пульку, и длительность процесса торможения.

Характерной особенностью сигнала, регистрируемого данным каналом, был острый пик длительностью порядка 10 мкс, предшествующий основному сигналу длительностью около 500 мкс с фронтом 100 мкс (рис. 8). Данный пик, имеющий противоположную основному сигналу полярность и на порядок меньшую длительность, соответствует звуковой волне, генерируемой при ударе пульки о поверхность пластилина. Этот сигнал-предшественник является основным для датчика акустической эмиссии, а далее этот датчик переходит в режим работы акселерометра и воспринимает совместное воздействие звуковых волн и ускорения куска пластилина, в который он вмурован, как регистрируемые воздействия.

Выстрел из пневматического пистолета, к сожалению, не может считаться идеальным сигналом для калибровки гибридной системы измерения силы тяги плазменного двигателя. Процессы торможения пульки каждый раз немного отличаются, что ярко демонстрирует рис. 8, на котором нет резонансных колебаний, и другая тонкая структура временной зависимости. При этом общий вид сигналов, их уровни и длительности неплохо совпадают.

Фиксируемые данным каналом сигналы открывают реальную возможность изучения тонкой временной структуры силового воздействия газовой струи на гибридную регистрирующую систему и подтверждают правильность выбранной концепции измерения силы тяги плазменного двигателя, использующей многоканальную систему регистрации силового воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает возможность регистрации как интегральной величины импульса силы, так и ее временной зависимости с разрешением не хуже 100 мкс по времени и 0.1 Н по силе с помощью рассматриваемой гибридной системы измерения динамического воздействия, содержащей лазерный датчик перемещения и быстродействующие датчики силы, ускорения и акустической эмиссии.

При этом входящий в состав системы датчик перемещения, позволяющий измерять как амплитуду свободных колебаний, так и скорость, приобретенную инертной массой к концу силового воздействия, позволяет верифицировать информацию с каналов регистрации силы и ускорения путем интегрирования зарегистрированных временных зависимостей с учетом АЧХ трактов регистрации силы и ускорения. Тот факт, что различные каналы измеряют внешнее силовое воздействие в пересекающихся частотных диапазонах, открывает возможность их взаимной калибровки через сравнение спектральных компонент известного тестового воздействия в процессе калибровки измерительной системы.

Можно констатировать следующий набор факторов, влияющих на возможности гибридной системы регистрации импульсного силового воздействия газовой струи.

Резонансная частота подвеса инертной массы системы регистрации должна быть как можно ниже. В этом случае повышается точность измерения интегральной величины импульса силы. Относительная ошибка в оценке данного параметра пропорциональна $(f_1 \tau_n)^2$. При этом если требования по точности не слишком строгие, то имеет смысл повышать f_1 , поскольку в этом случае система становится более жесткой и падает амплитуда собственных колебаний маятника, что важно при

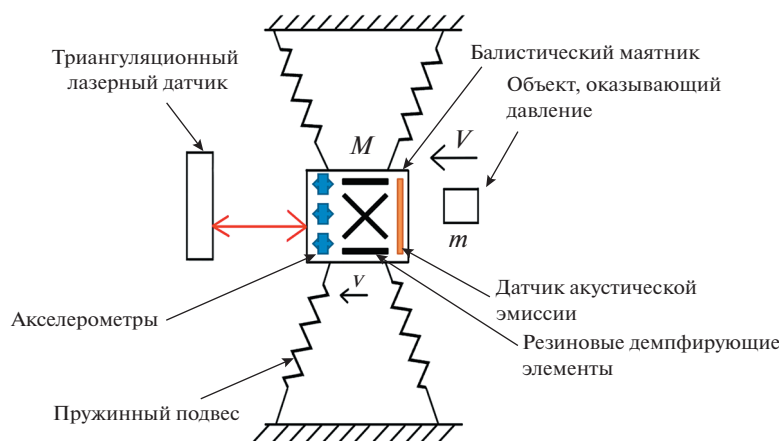


Рис. 9. Возможная система регистрации силового воздействия газовой струи, состоящая из металлического кубика, датчика перемещения, акселерометров, пьезокерамического приемника, системы подвеса и демпфирования.

регистрации не единичного импульса силы, а пачки импульсов. Так для длительности импульса тяги менее 10 мс и требуемой баллистической точности 1% резонансная частота подвеса может быть 10 Гц.

Масса ловителя внешнего воздействия должна быть минимизирована. В этом случае происходит расширение частотного диапазона датчиков силы и возможно метрологически корректное измерение силы внешнего воздействия в более широком диапазоне частот. Данный канал является наиболее информативным в плане изучения временной зависимости силы воздействия, поскольку плоская часть его АЧХ начинается с единиц герц (f_1) и простирается до единиц килогерц (f_2).

Канал регистрации, ассоциированный с трехкоординатным акселерометром, установленным на первичной массе ловителя силы, нося вспомогательный характер на низких частотах и имея сложную АЧХ, становится основным на частотах выше f_2 . Именно данный канал позволяет количественно оценить уровень неравномерности тяги с временным разрешением ~ 100 мкс. В высокочастотной области кроме собственного резонанса акселерометра f_a будут проявляться резонансы элементов конструкции, и поэтому крайне важно, чтобы они отсутствовали или имели собственные частоты существенно выше частот пульсаций силового воздействия.

Канал на основе датчика акустической эмиссии, регистрирующий звуковые колебания, возникающие в конструкции первичного ловителя силы, является самым высокочастотным и наиболее приближенным к области силового взаимодействия с газовым потоком. Произвести его калибровку в единицах силы давления газовой струи скорее всего не удастся, так как кроме механических резонансов здесь необходимо учитывать и газоди-

намические особенности работы ловителя струи. Этот канал системы регистрации следует использовать в индикаторном режиме, для оценки факта наличия высокочастотных флуктуаций и длительности фронта нарастания и спада силового воздействия. Его абсолютная калибровка в параметрах силы будет возможна, только если в исследуемом или специальном тестовом воздействии будут значимые спектральные компоненты, уверенно регистрируемые и каналом акселерометра, и датчиком акустической эмиссии.

На основании теоретического анализа и полученных экспериментальных данных оптимальной представляется следующая конструкция гибридной измерительной системы, рис. 9.

Рабочей системой регистрации силового воздействия газовой струи мог бы быть монолитный стальной кубик размером $10 \times 10 \times 10$ см и весом 5 кг, подвешенный на пружинах. В качестве измерительных каналов в него должны быть интегрированы: три акселерометра, секционированный пьезоэлектрический датчик звукового давления, резиновые демпферы и измеритель перемещения. Такая система сочетает в себя свойства и баллистического маятника, и инерциальной измерительной системы, измеряющей силовое воздействие через регистрацию ускорения, испытываемого пробным телом под действием внешней силы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ за предоставленное научное оборудование и К.Л. Губскому за плодотворное обсуждение проблематики измерения силы тяги плазменных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Герасимова А.М. и др. // Инженерный вестник. 2014. № 1. С. 3.
2. Сидоренко Е.И. и др. Офтальмология. 2002. Москва: Гэотар-мед.
3. Яковлев Е.А. Испытания космических электродвигательных установок: Учебник для ВУЗов. 1981. Москва: Машиностроение.
4. Гончаров П.С. и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 573–577.
5. Vedenov A.A., Velikhov E.P., Sagdeev R.Z. // Sov. Phys. Usp. 1961. V. 4 (2). P. 332–369. <https://doi.org/10.1070/PU1961v004n02ABEH003341>
6. Завьялов В.С. и др. Патент РФ 2672897. <https://patents.google.com/patent/RU2672897C1>.
7. Гимпилович Ю.Б., Чоков П.В. // Вестник СевГУ. Сер.: Информатика, электроника, связь. 2000. № 31.
8. Боккер П. Передача данных. Том 1. (Техника связи в системах телеобработки данных). Основы. 1980. Москва: Связь.

Analysis of a Detection System for the Impact Force of a Gas Jet

F. A. Belolutskiy¹, T. V. Kazieva¹, A. A. Morozov¹, V. N. Reshetov², *, and M. V. Reshetova¹¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia²Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Moscow, 108840 Russia

*e-mail: nreshetov@yandex.ru

Received July 22, 2022; revised July 22, 2022; accepted July 25, 2022

Abstract—A detection system for impulse force that consists of a ballistic pendulum coupled with displacement, force, acceleration and acoustic emission sensors is considered. Analysis of frequency and impulse responses for its measurement channels is conducted, and testing results for model detection systems are presented. Structural and hardware constraints on the time resolution of the proposed hybrid gas-jet-force detection system are established. It is shown that it is possible to register dynamic components of the force with a time resolution of at least 100 μ s and a force threshold of 0.1 N with serial piezoceramic sensors.

Keywords: dynamic characteristics of a system, impulse response, frequency response, thrust measurement, gas jet catchers, metrology, plasma propulsion engines, gas jet thrust, gas jet force, impulse force detection system