

УДК 004.622:629.78

ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ДИНАМИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРАХ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

К.В. Пономарев, Н.К. Пономарев

К.В. Пономарев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)
Н.К. Пономарев (ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»)

В ходе старта и посадки на организм космонавта воздействуют перегрузки, которые состоят из основного вектора перегрузки и разнонаправленных возмущений в виде вибраций. В динамических тренажерах моделируется воздействие основного вектора перегрузки, а воздействие вибраций в настоящее время не применяется. В статье представлен вариант аппаратной реализации кинематической обратной связи и метод программной обработки макро- и микродинамических воздействий на кресло космонавта во время тренировок на динамических тренажерах. Разработанное решение развивает подход к моделированию пространственно-временной микродинамики в условиях перегрузок.

Ключевые слова: центрифуга, космический тренажер, вибрации, обратная связь, факторы космического полета

Approach to Usage of Kinematic Feedback in Dynamic Simulators of Crewed Spacecraft. K.V. Ponomarev, N.K. Ponomarev

During the launch and landing, a cosmonaut's body is affected by g-loads, which consist of the main g-load vector and multidirectional disturbances in the form of vibrations. Dynamic simulators simulate the effects of the main g-load vector, but the effects of vibrations are not currently applied. The article presents a variant of the hardware implementation of haptic feedback and a software processing method of macro- and microdynamic effects on a cosmonaut's seat during training on dynamic simulators. The developed solution expands an approach to modeling spatiotemporal microdynamics under g-load.

Keywords: centrifuge, space simulator, vibrations, haptic feedback, space flight factors

В повседневной жизни каждый человек испытывает перегрузки, которые появляются при воздействии внешних сил. Мы регулярно сталкиваемся с перегрузками малых значений, например, в момент начала движения лифта (до 1,2 G), ускоряясь в автомобиле (от 0,28 до 1,65 G), взлетая на самолете (до 1,5 G), приземляясь на парашюте (до 1,8 G) и др.

Многие космонавты в своих интервью рассказывают о своих ощущениях от перегрузок в ходе старта и посадки.

Из воспоминаний космонавта О.В. Котова: «Ощущения во время выведения на орбиту смазываются очень напряженной работой: все время занят

контролем приборов, связью с Землей, просмотром бортовой документации. Единственное, что замечаешь, – отделение ступеней. Первые две отделяются сравнительно мягко, масса оставшейся ракеты еще велика. А вот отделение третьей пропустить трудно – сравнимо с хорошим пинком под зад. Срабатывают пироболты, отбрасывают назад остатки ракеты, и начинается состояние невесомости» [1].

Из воспоминаний космонавта А.М. Самокутяева: «Кроме перегрузки вход в атмосферу сопровождался сильной вибрацией. Представьте, что Ваша машина едет по хорошим кочкам на одних дисках, без шин. Вот так примерно трясло спускаемый аппарат. И сильнейший гул, больше, чем в метро. Затем характерный звук и удар – это вышли стропы и открылся парашют, сначала вытяжной, затем основной. Снова перегрузка, сильнейшая болтанка и раскачка. Затем перецепка и закрутка – мы все это чувствуем физически и понимаем, что происходит» [2].

Космонавт И.В. Вагнер в своем интервью отметил, что он понимал, что не успеет посмотреть первые несколько витков на Землю в иллюминатор, так как в невесомости начинается очень активная работа, но во время старта хорошо ощущаются вибрации и перегрузки и ему были интересны ощущения, как работают двигатели, как действуют перегрузки [3].

Цель данной работы заключается в выявлении способа повышения достоверности моделирования динамических этапов полета при проведении подготовки на космических тренажерах при помощи добавления к моделируемым перегрузочным воздействиям вибрационных, которые позволят улучшить качество проводимых тренировок космонавтов.

Для достижения поставленной цели сформулируем следующие задачи:

1. Выявить возможные для использования актуаторы кинематической обратной связи, имеющие четкую фиксацию оси вибрационных воздействий.
2. Определить возможный способ документирования макро- и микродинамических воздействий на кресло космонавта.
3. Разработать программный метод обработки полученных перегрузочных данных в отношении разделения макро- и микродинамических воздействий в различные наборы данных.
4. Выполнить апробацию актуаторов кинематической обратной связи на экспериментальном стенде.

Действующие технические средства подготовки космонавтов

Значительной частью подготовки космонавтов являются практические занятия и тренировки на тренажерах.

Тренажеры космические – специальные установки, имитирующие условия космического пространства и космического полета. Используются для подготовки космонавтов, которые будут участвовать в космических полетах.

Специалисты по подготовке космонавтов стремятся к тому, чтобы тренажеры давали космонавтам максимально полную картину происходящего в реальном полете, и для этого тренажеры постоянно модернизируются и дорабатываются.

В настоящее время в Центре подготовки космонавтов (ЦПК) используются следующие технические средства подготовки космонавтов [4]:

- комплекс тренажеров российского сегмента Международной космической станции;
- комплекс тренажеров транспортного пилотируемого корабля «Союз»;
- различные функционально-моделирующие стенды и учебно-тренировочные натурные макеты;
- средства медицинской подготовки космонавтов;
- центрифуги для воспроизведения перегрузок;
- тренажеры и макеты для выживания в различных климато-географических зонах;
- гидролаборатория для подготовки к внекорабельной деятельности в открытом космосе;
- специальная авиационная техника для тренировок в условиях пониженной гравитации.

Для того чтобы познакомить космонавтов с тем, с чем им предстоит столкнуться, а заодно проверить вестибулярный аппарат, используют центробежные машины – центрифуги. Уникальная научная установка центрифуга ЦФ-18 (УНУ «ЦФ-18»), эксплуатируемая в ЦПК, может создавать перегрузки от 1 G до 30 G с ориентацией вектора перегрузки в любом заданном направлении. Кроме этого, в кабине создаются те условия, которые будут в условиях настоящего полета [5].

При проведении тренировок на центрифуге используют типовой график перегрузок при выведении транспортного пилотируемого корабля (ТПК) «Союз» на околоземную орбиту (рис. 1) и типовой график перегрузок при возвращении спускаемого аппарата ТПК «Союз» на Землю (рис. 2).

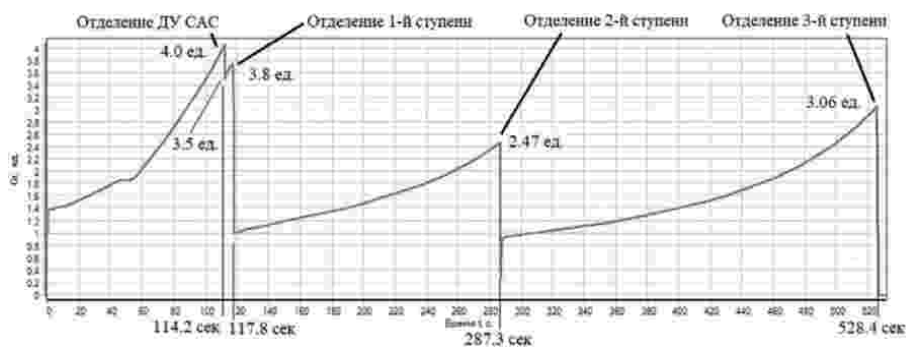


Рис. 1. Типовой график перегрузок при выведении ТПК «Союз» на околоземную орбиту

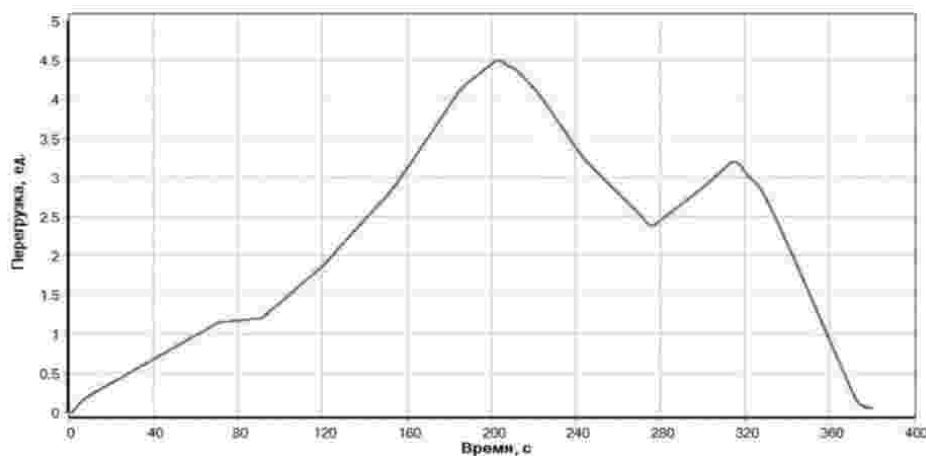


Рис. 2. Типовой график перегрузок при возвращении спускаемого аппарата ТПК «Союз» на Землю

Максимальная перегрузка при вращении по графику выведения составляет 4,0 ед., общее время вращения – около 9 мин. Максимальная перегрузка при вращении по графику спуска составляет около 4,5 ед., общее время вращения – около 6 мин [6].

С момента создания в тренажеры на базе центрифуг вносились доработки в соответствии с решаемыми задачами и изменяющимися требованиями к подготовке космонавтов, а также в связи с развитием технологий.

Одним из возможных направлений доработок тренажеров является введение управляемых колебаний рабочего места оператора по трем осям, так называемая кинематическая обратная связь в виде вибрационной отдачи.

Однако кинематическая обратная связь, присутствующая в виде вибраций при старте ракеты-носителя и при посадке спускаемого аппарата, в настоящее время не применяется. Для космонавтов, особенно для тех, кто еще не имеет опыта космических полетов, было бы полезно понимать, какой характер вибраций является нормальным в ходе выведения и спуска [5]. При выполнении послеполетных исследований с космонавтами установлено, что отсутствие вибраций «размывает» ощущения реального полета и вносит когнитивный диссонанс при выполнении послеполетных тестов [7]. Кроме того, появление кинематической обратной связи положительно скажется на сопротивляемости перегрузкам, так как космонавт будет переключать внимание и на виброотдачу. Исследования по теме виброотдачи уже проводились. В материалах XII Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» в 2017 г. опубликованы тезисы с применением «актуаторов» на основе электродвигателей с эксцентриками (рис. 3), наподобие вибромоторов у мобильных телефонов [5].

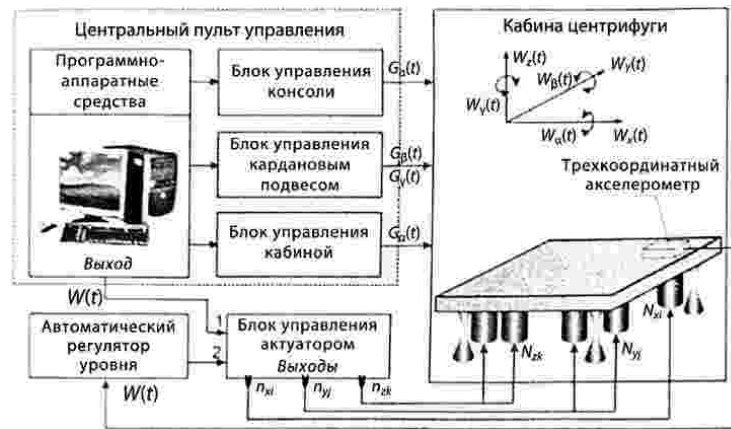


Рис. 3. Структурно-функциональная блок-схема динамического испытательного стенда на основе электродвигателей с эксцентриками

Суть подхода, описанного в работе [7], заключается в создании специализированных платформ-актуаторов, воспроизводящих пространственно-временные микродинамические воздействия (вибрацию с заданным спектром) при направленных перегрузках. Такие платформы-актуаторы должны обеспечивать генерацию и модуляцию управляемых быстроизменяющихся возвратно-поступательных и круговых орбитальных колебаний. Однако в условиях макродинамических нагрузок, вызванных вращением центрифуги, быстроизменяющиеся виброускорения претерпевают искажения относительно ранее заданных акселерограмм до полного их гашения [8].

Отдельной задачей, которую нужно будет решить при использовании актуаторов в виде вибромоторов, является управление направлением вибрационных воздействий, так как конструктивно данные актуаторы блокируют вибрации только по оси вращения эксцентрика (ось Z). По другим осям (X и Y) потребуется применять программно-механические методы управления, так как направление резонансных колебаний будет зависеть от начального положения эксцентрика при запуске двигателя.

Несмотря на потенциальную вредность вибраций, космонавты должны понимать, с чем они столкнутся в ходе реального космического полета, и ощутить это еще на этапе наземной подготовки.

Еще одной особенностью воздействия вибраций на организм человека является то, что вредное их действие на организм человека имеет механическую природу, по крайней мере, в диапазоне тех частот колебаний, которые возникают во время космического полета. Космический корабль на разных этапах выведения на орбиту имеет резонансную частоту от 4,5 Гц до 9 Гц. Это очень важно, так как резонансная частота тела человека в зависимости от его положения и способа фиксации лежит в диапазоне от 3 Гц до 12 Гц, а отдельные органы имеют более высокие собственные резонансные частоты (рис. 4) [9].

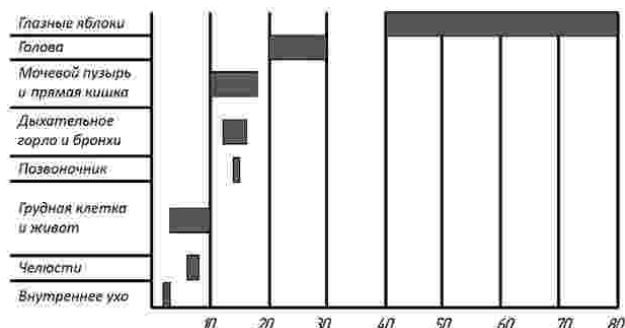


Рис. 4. Диаграмма, показывающая, на каких частотах резонируют отдельные части тела человека

Когда космический корабль вибрирует на какой-либо из этих частот, вибрация соответствующих органов человека резонансно увеличивается, эти органы деформируются, смещаются или теряют фиксацию, то есть происходит их механическое повреждение. Однако до этого в большинстве случаев возникает ощущение дискомфорта. Отмечалось, что при частоте колебаний 50 Гц пилоты не могли считывать показания приборов, так как именно при этой частоте начинают вибрировать глазные яблоки, и глаза словно застилает пеленой [9].

Несмотря на потенциальную вредность вибраций, космонавты должны понимать, с чем они столкнутся в ходе реального космического полета, и ощутить это еще на этапе наземной подготовки.

Кинематическая обратная связь с использованием низкочастотных аудиопреобразователей

Предлагаемый подход является развитием идеи управляемой вибрационной отдачи, но на основе низкочастотного аудиопреобразователя, закрепленного к креслу космонавта (рис. 5).



Рис. 5. Предлагаемый вариант крепления аудиопреобразователя к креслу космонавта

Общая идея заключается в том, чтобы получить данные мгновенных ускорений от акселерометров, установленных на борту космического корабля, с привязкой ко времени, затем обработать полученные данные и преобразовать их в низкочастотный аудиосигнал, который потом подается через усилитель на аудиопреобразователь при выполнении тренировок (рис. 6).

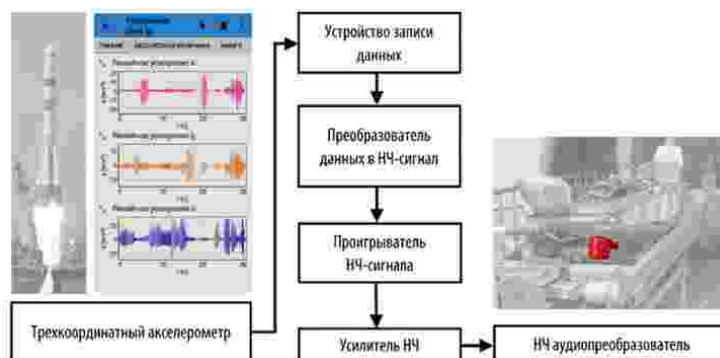


Рис. 6. Предлагаемая схема обработки данных по ускорению

Аудиопреобразователь представляет собой некоторое подобие звукового динамика, однако здесь движется не диффузор, а массивный неодимовый магнит, который и передает свою энергию на ту конструкцию, к которой закреплен корпус аудиопреобразователя (рис. 7). Чем больше масса неодимового сердечника, тем большую энергию он может передать конструкции, но и тем большее количество энергии он потребляет сам. Отличительной особенностью данного устройства является четкая фиксация оси вибрационных воздействий, которая определяется возвратно-поступательными движениями магнитного сердечника.

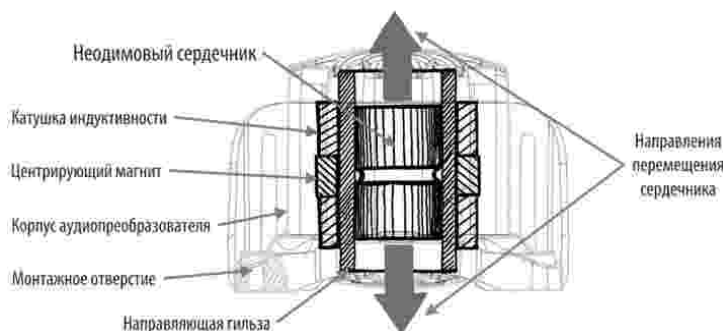


Рис. 7. Конструкция аудиопреобразователя

Для проверки данной идеи был собран тестовый стенд, в котором основным элементом выступал аудиопреобразователь с сердечником массой 450 г. Источником звукового сигнала являлся видеоролик с записью старта

ракеты-носителя «Союз» без дополнительной обработки звука. Несмотря на простоту стенда, кинематическая обратная связь получилась достаточно ощутимой.

При использовании аудиодорожек с выделенной низкочастотной составляющей в канале сабвуфера кинематическая обратная связь получается еще более выраженной, так как отсекаются «паразитные» высокочастотные составляющие.

При выполнении тестирования аудиопреобразователей были выявлены некоторые конструктивные недостатки, выражающиеся в ударах сердечника о демпферы верхней и нижней крышек корпуса на больших амплитудах сигнала, что сопровождается неприятным звуком. Перед применением в тренажере потребуется устранить данный недостаток.

Преобразование кинематических данных в акустический сигнал

Для вибрационной кинематической обратной связи важно иметь достоверные данные о силе вибраций и перегрузках, действующих на кресла космонавтов на разных этапах космического полета на транспортном корабле серии «Союз» и на перспективном транспортном корабле.

Существующая датчиковая аппаратура космических кораблей позволяет получить значения перегрузок, действующих на систему «ракета-носитель и космический корабль», но реального набора данных о вибрации, получаемых каждым из кресел космонавтов на этапах выведения и спуска, в настоящее время нет. Для получения достоверного набора данных потребуется проводить полетный эксперимент, позволяющий разместить в каждом кресле акселерометры с возможностью регистрации данных.

Полученные данные потребуется обработать: отделить от общего сигнала данные основной перегрузки и оставить только вибрации кресла космонавта, которые потребуется конвертировать в низкочастотный сигнал для аудиопреобразователя (рис. 8).



Рис. 8. Предлагаемая схема фиксации и обработки данных о вибрации

Для наземной апробации был проведен эксперимент с использованием УНУ «ЦФ-18» и двух планшетных компьютеров, аналогичных бортовым. На планшеты были установлены два различных приложения, которые могут записывать показания встроенных акселерометров во внутреннюю память, чтобы проверить и выбрать то, которое записывает данные с лучшим качеством. Частота опроса акселерометров составляет 100 Гц. Планшеты были закреплены к креслу космонавта, после чего было выполнено вращение по графику спуска с околоземной орбиты с перегрузками около 5 G [10].

Были получены два файла, которые представляют собой таблицы с данными о времени и показаниями акселерометра по трем осям. Пригодным для дальнейшей обработки оказался один из них, так как на первом планшете приложение или акселерометр работали с ошибками по сравнению с результатами второго планшета. Визуальная интерпретация данных представлена на графиках 1 и 2 рис. 9.

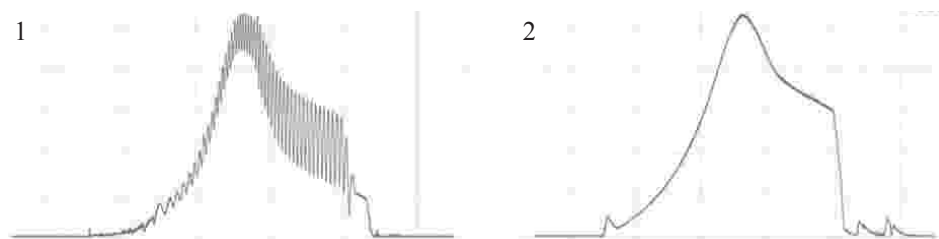


Рис. 9. Графики перегрузок, полученные на 1-м и 2-м бортовых планшетах

Данные со второго планшета, представленные в графическом виде (рис. 10), сравнили по форме и по значениям перегрузок с задающим графиком вращения центрифуги (рис. 11).

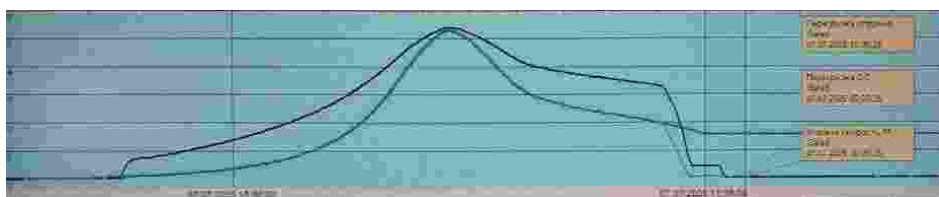


Рис. 10. График перегрузок с акселерометров бортовых средств космического корабля



Рис. 11. Задающий график циклограммы вращения УНУ «ЦФ-18»

Полученный полный массив данных был подвергнут дополнительной программной обработке для выделения только вибрации кресла космонавта (рис. 12).

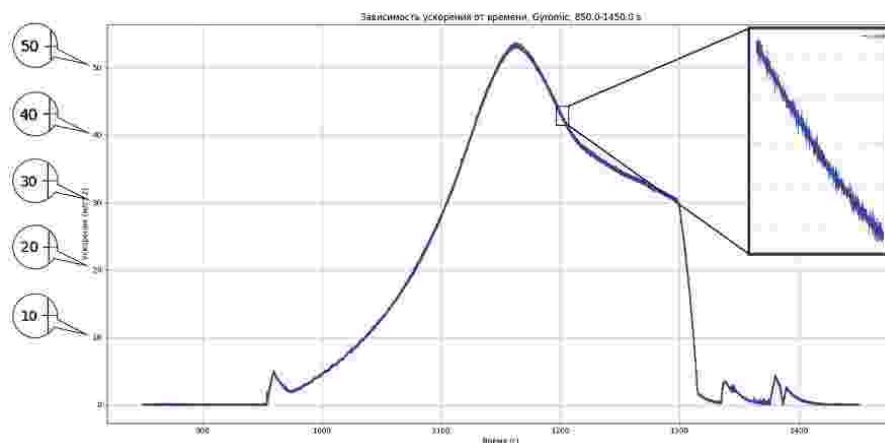


Рис. 12. График перегрузок, построенный на полном наборе данных

Для обработки сигналов с датчиков используют различные методы: медианный фильтр, скользящее среднее, фильтр Калмана и др.

Для выделения основного графика перегрузки был применен метод скользящего среднего (рис. 13), но так как данный метод имеет свойство запаздывания, пришлось его модифицировать и делать расчеты не относительно начала окна выборки, а относительно его центра. Это позволило избавиться от запаздывания, но привело к небольшим потерям части данных в начале и в конце графика (в половину окна выборки, равном половине секунды).

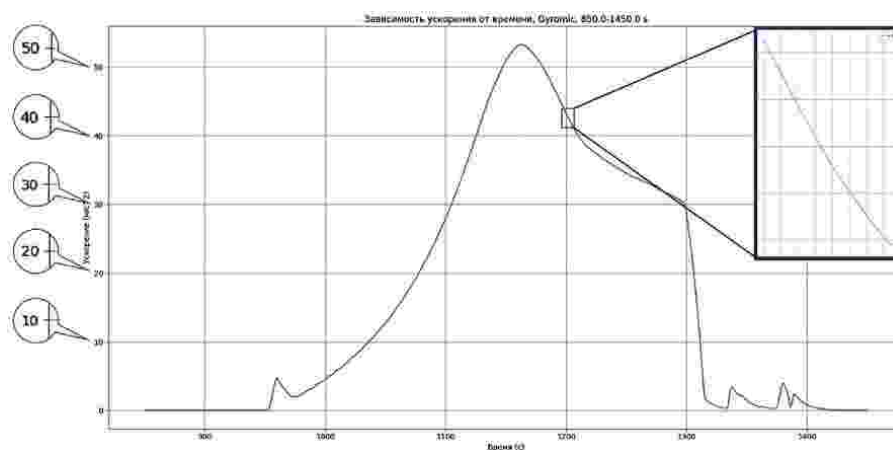


Рис. 13. График перегрузок, построенный по методу скользящего среднего

В результате фильтрации данных был получен график вибраций кресла космонавта (рис. 14), который был преобразован в аудиозапись и сохранен для последующей проверки на тестовом стенде с аудиопреобразователем.

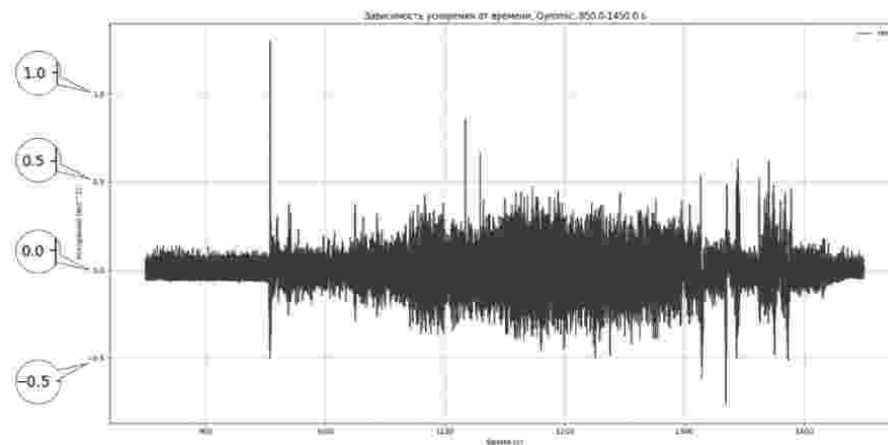


Рис. 14. График вибраций кресла космонавта

Для программной обработки применяется язык Python. В качестве входных данных использовался файл с исходными данными акселерометра, а в качестве выходных данных получают графики для визуальной оценки результата и готовая к воспроизведению аудиозапись.

В связи с тем, что график вибраций кресла космонавта, а как следствие, и аудиозапись, может содержать составляющую со случайным шумом, тестовый стенд был доработан: вместо ранее используемого жесткого крепления аудиопреобразователя к основанию были применены резиновые виброгасители, которые подавляют часть вибраций выше 20 Гц. Это решение играет роль механического частотного фильтра для тестового стенда.

Тестовый вариант стенда был продемонстрирован на выставке в рамках XVI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». Была проведена серия экспериментальных тестирований с участием действующих космонавтов и специалистов ЦПК, которые отметили положительный эффект от вибрационной обратной связи. Участники отметили, что наличие кинематической обратной связи было бы полезно не только для динамических тренажеров на центрифугах, но и для комплексных тренажеров ТПК «Союз». В качестве вариантов развития было предложено использовать более мощные аудиопреобразователи и размещать их таким образом, чтобы моделировать вибрации для каждой координатной оси.

Реализация данного предложения на центрифуге ЦФ-18 позволит более точно моделировать акселерационные условия, возникающие на этапе старта ракеты-носителя, что расширит функциональные возможности УНУ «ЦФ-18» и спектр решаемых на ней задач [11].

Выводы

1. Поиск актуаторов кинематической обратной связи, имеющих четкую привязку вибрационных воздействий к оси координат, выполнен успешно.

2. Разработан алгоритм обработки данных по ускорению в части разделения макро и микродинамических воздействий на кресло космонавта. Данные о микродинамических воздействиях сконвертированы в аудиоформат, пригодный для использования в экспериментальном стенде.

3. Экспериментальная апробация стенда получила положительный отклик от участников тестирования. Это говорит о том, что применение кинематической обратной связи в тренажерах пилотируемых космических кораблей может повысить качество подготовленности космонавтов к космическому полету, предоставив недостающие ощущения при выполнении комплексных тренировок.

4. Для получения требуемого набора вибрационных данных необходимо провести натурный космический эксперимент, заключающийся в размещении на чаше кресла космонавта внутри спускаемого аппарата 3D-акселерометра и устройства записи его показаний. При этом потребуются получить данные на этапах старта ракеты-носителя и выведения на орбиту, а также при возвращении спускаемого аппарата с экипажем на Землю.

5. При наличии реальных данных о перегрузках, снятых с кресел космонавтов, станет возможным решение следующих задач: получение данных о вибрации кресел и основных перегрузок космического корабля для валидации графиков выведения и спуска, использующихся на центрифугах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Как проходит полет в космос от старта до посадки: рассказывает 100-й космонавт России // Men Today: [сетевое издание]. – URL: <https://www.mentoday.ru/life/experience/polet-v-kosmos-ot-starta-do-posadki-rasskazyvaet-kosmonavt-oleg-kotov/> (дата обращения: 07.03.2025).
2. Космос не пахнет // НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина: [сайт]. – URL: <https://www.gctc.ru/print.php?id=1003> (дата обращения: 07.03.2025).
3. Космонавт Вагнер поделился воспоминаниями о полете на МКС // Russia Today: [сетевое издание]. – URL: <https://russian.rt.com/science/news/934629-kosmonavt-mks-polet> (дата обращения: 25.01.2026).
4. ТСПК Центра // НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина: [сайт]. – URL: <https://www.gctc.ru/main.php?id=110> (дата обращения: 07.03.2025).
5. Пономарев, Н.К. Средства кинематической обратной связи в имитаторах перегрузок для тренажеров пилотируемых космических кораблей // Материалы XV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». – Звездный городок: Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, 2023.
6. Исследование функционального состояния космонавтов в процессе сквозного моделирования этапов космического полета на центрифуге ЦФ-18 / К.С. Киреев,

- А.С. Заверюха, Н.В. Власова, Я.Ю. Миняйло [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2024 – № 2(51). – С. 63–78.
7. Подход к реализации пространственно-временных микродинамических воздействий при перегрузках в центрифугах / А.И. Крылов, Е.А. Спиринов, В.Н. Киршанов, И.Н. Гаврик // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». – Звездный городок: Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, 2017.
 8. Крылов, А.И. Динамический испытательный стенд с комбинированными микро- и макродинамическими воздействиями / А.И. Крылов, Е.А. Спиринов, В.Н. Киршанов // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». – Звездный городок: Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, 2015.
 9. Факторы космического полета // НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина: [сайт]. – URL: <https://www.gctc.ru/print.php?id=940> (дата обращения: 07.03.2025).
 10. Пономарев, Н.К. Преобразование кинематических данных в акустический сигнал: метод и программная реализация / Н.К. Пономарев, К.В. Пономарев // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». – Звездный городок: Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина 2025.
 11. Киршанов, В.Н. Уникальная научная установка «Центрифуга ЦФ-18» / В.Н. Киршанов, И.А. Гришина // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». – Звездный городок: Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, 2025.

REFERENCES

1. Space Flight: from Launch to Landing: a Story from the 100th Cosmonaut of Russia // Men Today: [Online publication]. – URL: <https://www.mentoday.ru/life/experience/polet-v-kosmos-ot-starta-do-posadki-rasskazyvaet-kosmonavt-oleg-kotov/> (access on: 03/07/2025).
2. Space does not smell // Federal State Budgetary Organization “Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center”: [website]. – URL: <https://www.gctc.ru/print.php?id=1003> (access on: 03/07/2025).
3. Cosmonaut Wagner Shared his Memories of the Flight to the ISS // Russia Today: [Online publication]. – URL: <https://russian.rt.com/science/news/934629-kosmonavt-mks-polet> (access on: 01/25/2026).
4. The Center’s Training Facilities // Federal State Budgetary Organization “Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center”. – URL: <https://www.gctc.ru/main.php?id=110> (access on: 03/07/2025).
5. Ponomarev, N.K. Kinematic Feedback Means in G-load Simulators for Crewed Spacecraft Simulators // Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”. – Star City, 2023 (in Russian).
6. The Study of Cosmonauts’ Functional Status During the End-to-End Simulation of Spaceflight Phases on the Centrifuge TsF-18 / K.S. Kireev, A.S. Zaverukha, N.V. Vlasova, Ya.Yu. Minyailo [et al.] // Manned Space Flights. – 2024 – No 2(51). – P. 63–78 (in Russian).

7. An Approach to the Implementation of Spatiotemporal Microdynamic Impacts under G-loads in Centrifuges / A.I. Krylov, E.A. Spirin, V.N. Kirshanov, I.N. Gavrik // Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”. – Star City, 2017 (in Russian).
8. Krylov, A.I. Dynamic Test Bench with Combined Micro- and Macrodynamics Impacts / A.I. Krylov, E.A. Spirin, V.N. Kirshanov // Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”. – Star City, 2015 (in Russian).
9. Space Flight Factors // Federal State Budgetary Organization “Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center”: [website]. – URL: <https://www.gctc.ru/print.php?id=940> (access on: 03/07/2025).
10. Ponomarev, N.K. Transformation of Kinematic Data into an Acoustic Signal: Method and Software Implementation / N.K. Ponomarev, K.V. Ponomarev // Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”. – Star City, 2025 (in Russian).
11. Kirshanov, V.N. Centrifuge TsF-18: the Unique Scientific Installation / V.N. Kirshanov, I.A. Grishina // Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”. – Star City, 2025 (in Russian).