

УДК 629.7.054.07

Особенности моделирования работы системы амортизации бесплатформенного инерциального измерительного прибора на языке Python и в среде Simulink

П.А. Илюшин, В.П. Наумченко, Д.Г. Пикунов, А.В. Соловьев
филиал АО «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И.Кузнецова»
E-mail: P.Ilyushin@russian.space

Аннотация

В настоящей работе рассматривается процесс разработки системы амортизации и демпфирования прецизионного вибрационно-стойкого бесплатформенного инерциального измерительного прибора космического назначения. В рамках проведенных работ были созданы математические модели в MATLAB/Simulink и Python для решения линейной системы дифференциальных уравнений в символьном виде и нелинейной системы численными методами. Результаты частично подтверждены в рамках натурных испытаний.

Введение

В рамках разработки вибростойкого высокоточного инерциального измерительного прибора космического назначения (прибор) было обнаружено, что примененные в нем вибрационно-струнные акселерометры (ВСА) выходят из строя при максимальных режимах вибрационного воздействия, характерных для нештатного полета космического аппарата. Причем конструкция ВСА отработана и вносить в нее изменения недопустимо.

Возникла необходимость создания внутренней системы амортизации прибора с подвижным блоком чувствительных элементов (БЧЭ). В процессе предварительной проработки вопроса было обнаружено, что эффективность гашения колебаний в ВСА увеличивается с уменьшением собственной частоты амортизации БЧЭ. Однако, чем меньше частота амортизации, тем больше собственные перемещения БЧЭ и тем больше размер корпуса прибора и габариты необходимой системы демпфирования для уменьшения коэффициента усиления на резонансной частоте.

В итоге задача свелась к классической задаче поиска оптимального решения по двум критериям (перемещение ВСА и БЧЭ) при варьировании конструктивных параметров системы амортизации и демпфирования (САД), определяющих динамические характеристики системы.

Исследуемый динамический объект и его математическая модель

Ранее уже проводился цикл экспериментальных и теоретических исследований прибора-прототипа (прототип), в котором также применялись ВСА и БЧЭ с САД. В ВСА реализована собственная САД, предназначенная для защиты чувствительного элемента ВСА от внешних ударов. Однако, эта система при высокоэнергетических воздействиях может приводить к ударам подвижной части ВСА о его корпус. Для исключения этого в прототипе применен еще один амортизатор, представляющий площадку, связанную с корпусом прибора посредством равножестких пружин. Уменьшение колебаний самой площадки обеспечивается настроенными на частоту этих колебаний виброгасящими демпферами (ВД). В прототипе ВСА установлены соосно, в приборе ВСА расположены по конусу (**Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**).

В ходе натурных и теоретических исследований было обнаружено, что исходная САД прототипа не позволяет обеспечить вибростойкость при требуемых воздействиях [1]. Было принято решение подобрать параметры САД, которые можно технически варьировать, исходя из заданных требований к перемещениям ВСА и БЧЭ.

Движение в САД прибора можно описать в виде системы из 8 уравнений в векторной форме (1):

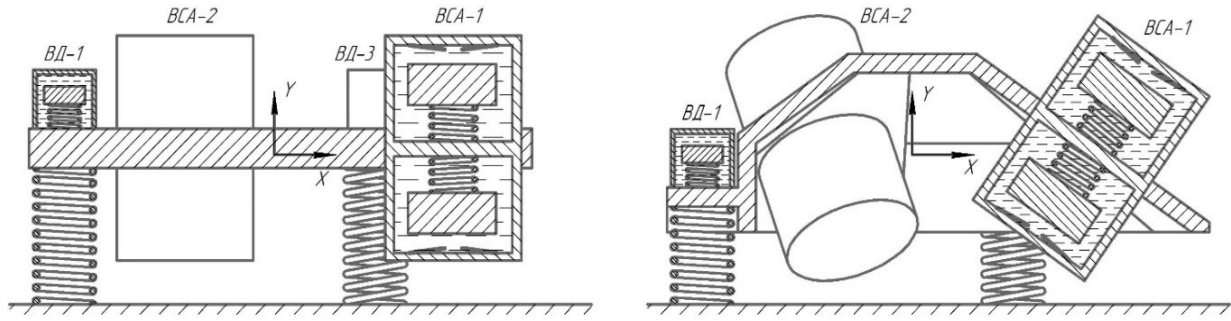


Рисунок 1 – Принципиальная схема САД (слева прототип, справа прибор)

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{bi} \cdot (\ddot{\vec{R}}_{bi} - \vec{g}) + \sum_{i=1}^3 \left((\beta_{bi} + \beta_{vi}) \cdot (\dot{\vec{R}}_{bi} - \dot{\vec{R}}_{in}^b) + C_{bi} \cdot (\vec{R}_{bi} - \vec{R}_{in}^b) - \right. \\ \left. - C_{di} \cdot (\vec{R}_{di} - \vec{R}_{bi}^d) - H_{ai}^{-1} \cdot C_{ai} \cdot H_{ai} \cdot (\vec{R}_{ai} - \vec{R}_{bi}^a) + \vec{F}_{fi} \right) = \vec{0} \\ M_{di} \cdot (\ddot{\vec{R}}_{di} - \vec{g}) + \beta_{di} \cdot (\dot{\vec{R}}_{di} - \dot{\vec{R}}_{bi}^d) + C_{di} \cdot (\vec{R}_{di} - \vec{R}_{bi}^d) = \vec{0} \\ M_{ai} \cdot H_{ai} \cdot (\ddot{\vec{R}}_{ai} - \vec{g}) + \beta_{ai} \cdot H_{ai} \cdot (\dot{\vec{R}}_{ai} - \dot{\vec{R}}_{bi}^a) + C_{ai} \cdot H_{ai} \cdot (\vec{R}_{ai} - \vec{R}_{bi}^a) = \vec{0} \end{array} \right\} i = 1..3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{bi} \cdot \ddot{\vec{\epsilon}}_b + \sum_{i=1}^3 \left(\vec{R}_{bi} \cdot [(\beta_{bi} + \beta_{vi}) \cdot (\dot{\vec{R}}_{bi} - \dot{\vec{R}}_{in}^b) + C_{bi} \cdot (\vec{R}_{bi} - \vec{R}_{in}^b)] + \vec{r}_{fi}^b \cdot \vec{F}_{fi} + \right. \\ \left. \vec{R}_{ai} \cdot H_{ai}^{-1} \cdot C_{ai} \cdot H_{ai} \cdot (\vec{R}_{ai} - \vec{R}_{bi}^a) + \vec{R}_{di} \cdot C_{di} \cdot (\vec{R}_{di} - \vec{R}_{bi}^d) \right) = \vec{0} \\ (J_{bi} + M_{bi} \cdot \vec{r}_{fi}^{b2}) \cdot \ddot{\vec{\epsilon}}_b - \vec{R}_{fi}^b \cdot M_{bi} \cdot (\ddot{\vec{r}}_b - \vec{g}) + \\ + \sum_{i=1}^3 \left((\vec{R}_{bi} - \vec{R}_{fi}^b) \cdot [(\beta_{bi} + \beta_{vi}) \cdot (\dot{\vec{R}}_{bi} - \dot{\vec{R}}_{in}^b) + C_{bi} \cdot (\vec{R}_{bi} - \vec{R}_{in}^b)] + \right. \\ \left. + (\vec{R}_{di} - \vec{R}_{fi}^b) \cdot C_{di} \cdot (\vec{R}_{di} - \vec{R}_{bi}^d) + (\vec{R}_{fi} - \vec{R}_{fi}^b) \cdot \vec{F}_{fi} + \right. \\ \left. + (\vec{R}_{ai} - \vec{R}_{fi}^b) \cdot H_{ai}^{-1} \cdot C_{ai} \cdot H_{ai} \cdot (\vec{R}_{ai} - \vec{R}_{bi}^a) \right) = \vec{0} \end{array} \right\} j = 1..3 \quad (1)$$

В формуле (1):

in, a, b, d, v – элементы конструкции: корпус, БЧЭ, ВСА, ВД и дополнительное вязкое трение, соответственно (индекс снизу – элемент, индекс сверху – относительно какого элемента считается перемещение);

M, β, C, J – масса, вязкость жесткость, момент инерции элемента;

$\ddot{\vec{\epsilon}}_b, \dot{\vec{\epsilon}}_b, \vec{\epsilon}_b$ – угловые ускорение, скорость и поворот БЧЭ;

$H, \dot{H}$ – матрица поворота элемента и ее производная с учетом $\dot{\vec{\epsilon}}_b, \vec{\epsilon}_b$;

$\ddot{\vec{R}}, \dot{\vec{R}}, \vec{R}$ – линейные ускорение, скорость и перемещение элемента с учетом H и $\dot{H}$;

i – номер элемента; j – номер элемента силы трения; $\vec{F}_f$ – сила трения.

Первым этапом решения задачи стало рассмотрение упрощенной линейной динамической системы САД прототипа [1] в которой происходило движение центров масс БЧЭ, ВСА, ВД. Элементы считались

идентичными, т.е. исследовалось 3 степени свободы (уравнения в (1), отмеченные рамкой, в скалярной форме). Затем была разработана нелинейная модель [3], в которой было учтено срабатывание упоров в ВСА при достижении заданного перемещения. Нелинейная модель также уточнена в части кинематики ВСА и БЧЭ. Перемещения стали трехмерными векторами, а скалярные параметры САД были преобразованы в формат матриц 3 на 3. В промежуточном варианте было добавлено демпфирование в виде силы сухого трения, приложенной к центру масс БЧЭ и не вызывающей угловых колебаний. В окончательной модели три силы трения приложены в трех различных точках БЧЭ.

Средства и методы моделирования

Линейная версия модели была разработана в Python, решение производилось символьным методом посредством библиотеки SymPy. К системе уравнений было применено преобразование Лапласа, перемещения БЧЭ и ВСА были представлены в виде передаточных

функций. Таким образом оценивался максимальный коэффициент усиления при варьировании параметров САД и принималось решение о соответствии комплекса параметров заданным требованиям.

Для удобства анализа модели реализован графический интерфейс, регуляторы позволяют

настраивать режим, варьируемые параметры и свойства рассматриваемой системы. Для автоматического поиска решений реализован метод перебора и генетический алгоритм.

Графики с результатами отображаются в окне, реализовано сохранение и построение по сохраненным рисункам gif-файла (Рисунок 1).

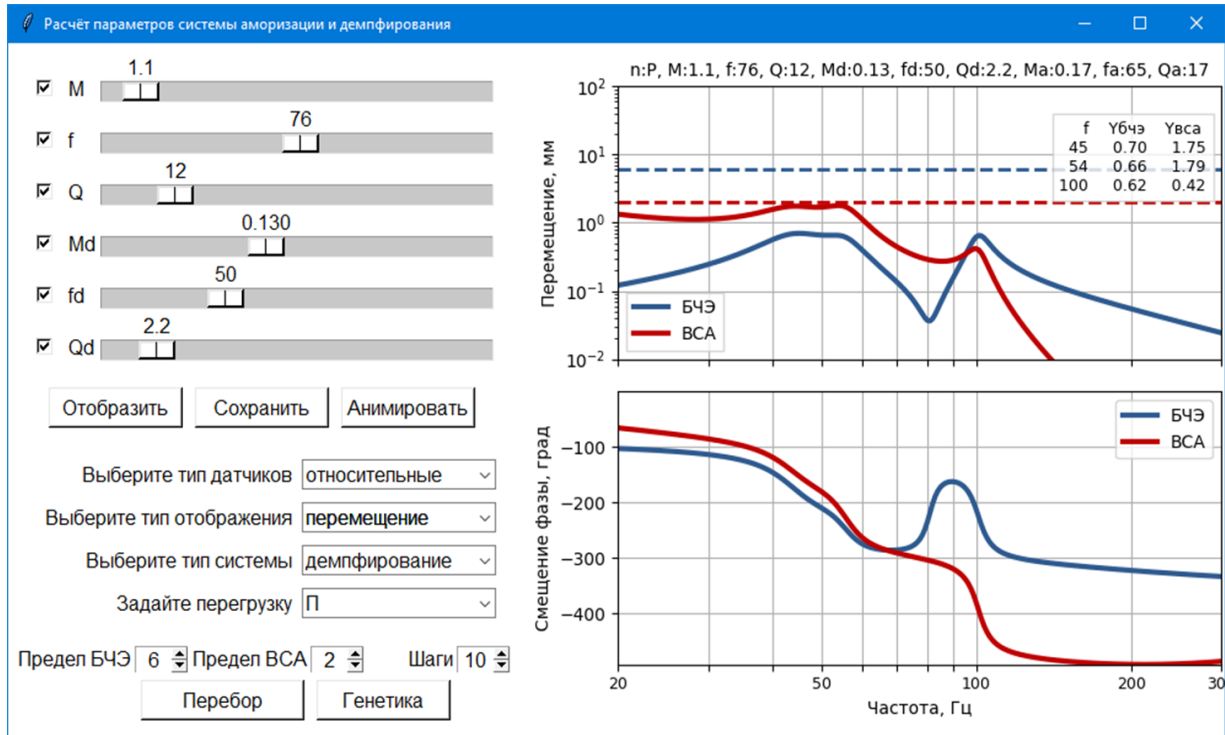


Рисунок 1 – Графический интерфейс управления вычислениями для линейной модели

Промежуточная нелинейная модель была разработана в MATLAB/Simulink, решение ищлось встроенными численными методами. Модель собиралась из базовых блоков. В Simulink производилось моделирование, дискретизации и вывод результатов. В MATLAB осуществлялся запуск модели, перебор параметров и сохранение графиков. Было добавлено сохранение файла с итоговым результатом моделирования по всем полученным в запуске замерам.

Окончательная нелинейная модель была реализована в Python, решение ищлось при помощи модуля Solve библиотеки SciPy. Система была предварительно преобразована в формат Коши. В этой модели были получены преимущества, характерные для скрипта с линейной моделью в Python: гибкость, производительность, удобство доработки и интегрирования в другие подсистемы. Сейчас управление происходит в формате корректировки скрипта в IDLE перед запуском, однако планируется интегрировать подсистему решения системы уравнений в разработанный ранее визуальный интерфейс.

В нелинейной модели на Python реализовано отображение тех же самых результатов, что и в модели MATLAB. Добавлены графики угловых колебаний, а на графиках АЧХ приводятся еще и характеристики пиков (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Файл с результатами не перезаписывается, а автоматически дополняется при новых запусках моделирования.

Оценка методов моделирования

Нелинейная модель в MATLAB/Simulink обладает преимуществом в том, что писать код для решения системы уравнений не нужно. При этом программировать перебор параметров и сохранение результатов все-равно приходится. Есть и некоторые ограничения с запуском исполняемого скрипта MATLAB на разных ПК. В остальном нелинейная модель в MATLAB/Simulink уступает модели в Python, позволяющей более гибко настраивать отображение результатов и сам процесс вычислений. Доступны библиотеки для применения недоступных в MATLAB методов и

проведения реализованных в нем возможных вычислений.

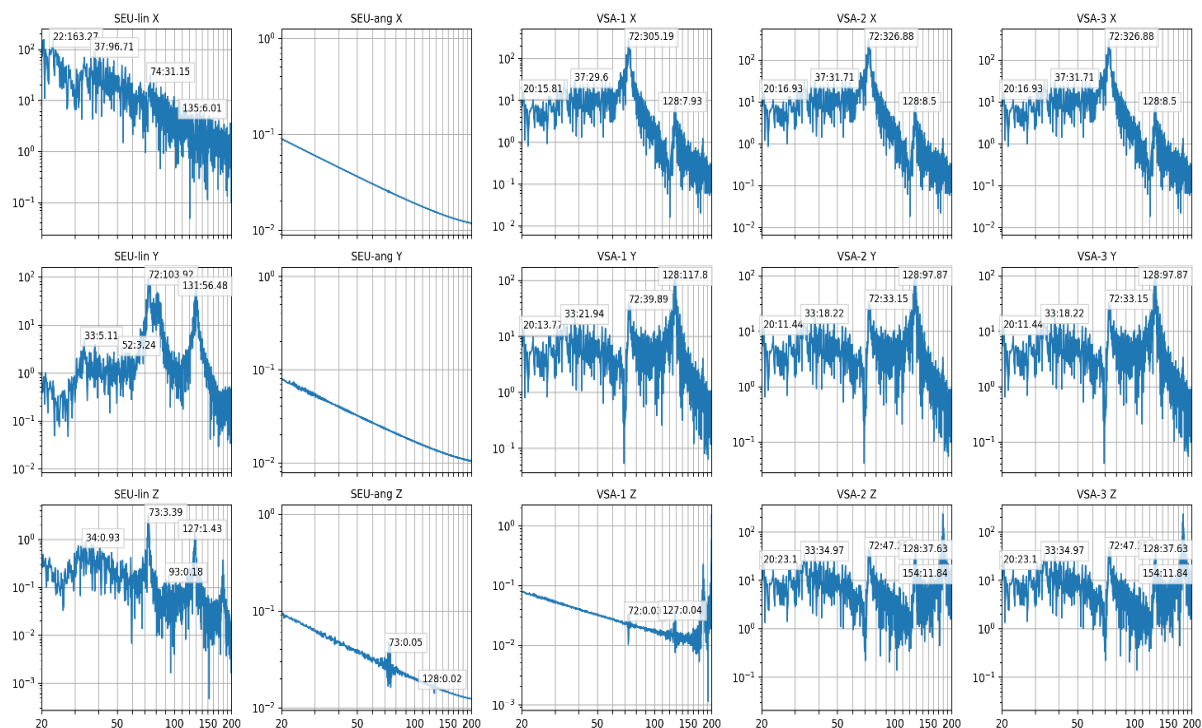


Рисунок 3 – Сохраняемый результат по результатам вычисления нелинейной модели

Также вычисления в MATLAB/Simulink шли быстрее, вероятно это связано с использованием метода RK45 [4].

В Python использовался метод LSODA, полезный для жестких задач, в отличие от метода RK45 в MATLAB/Simulink, предназначенного для решения нежестких задач.

Движение САД является жесткой задачей, для которой характерны множественные динамические процессы в разных временных масштабах.

Применяемый метод LSODA может автоматически переключаться между методом предсказания-коррекции Адамса (для нежестких задач) и методом BDF (для жестких задач).

Таким образом выбранный метод, при прочих равных точнее, надежнее, но потенциально медленнее нежестких методов. При замене метода на жесткий BDF в MATLAB/Simulink замер происходит заметно дольше, чем в Python.

Выводы

Подводя итог в части работы по подбору характеристик САД можно отметить, что при усложнении системы диапазон допустимых значений параметров сужался. Но в любом случае на текущий момент получены группы решений, обеспечивающие заданные требования по

перемещениям в системе. Результаты частично подтверждены в рамках натурных испытаний.

Литература

1. Илюшин, П. А. Анализ влияния параметров конструкции инерциального прибора на его динамические характеристики при внешнем вибрационном возмущении / П. А. Илюшин, В. П. Наумченко // XLVI Академические чтения по космонавтике: Сборник тезисов, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. В 4-х томах, Москва, 25–28 января 2022 года. Том 3. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022.
2. Илюшин, П. А. Моделирование работы линейной системы амортизации и демпфирования бесплатформенного инерциального измерительного прибора / П. А. Илюшин, В. П. Наумченко, С. А. Максимов [и др.] // Авиация и космонавтика: тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022.
3. Илюшин, П. А. Исследование обеспечения стойкости к внешним вибрационным возмущениям бесплатформенного инерциаль-

ного измерительного прибора при помощи нелинейных элементов системы амортизации / П. А. Илюшин, В. П. Наумченко, Д. Г. Пикунцов, А. В. Соловьев // Молодежь. Техника. Космос: труды четырнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 4 т., Санкт-Петербург, 23–27 мая 2022 года.

4. Медведева, Н. В. Сравнение численных методов решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений / Н. В. Медведева, Е. С. Скрыга Е.С. // Международный студенческий научный вестник, 2018. – № 2. - URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18343> (дата обращения: 12.04.2023).

Илюшин П.А., Наумченко В.П., Пикунцов Д.Г., Соловьев А.В. Особенности моделирования работы системы амортизации бесплатформенного инерциального измерительного прибора на языке Python и в среде Simulink. В настоящей работе рассматривается процесс разработки системы амортизации и демпфирования прецизионного вибрационно-стойкого бесплатформенного инерциального измерительного прибора космического назначения. В рамках проведенных работ были созданы математические модели в MATLAB/Simulink и Python для решения линейной системы дифференциальных уравнений в символьном виде и нелинейной системы численными методами. Результаты частично подтверждены в рамках натурных испытаний.

Ключевые слова: Амортизация, демпфирование, БИБ, моделирование, Python

Ilyushin P.A., Naumchenko V.P., Pikunov D.G., Solovyov A.V. Features of modeling the operation of the shock absorption system of a free-form inertial measuring device in Python and in the Simulink environment. In this paper, we consider the design of shock absorption and damping system for precious space strapdown inertial measurement unit for spacecraft. As part of the work, we create mathematical models in MATLAB/Simulink and Python to solve the linear system of differential equations in symbolic form and nonlinear system by numerical methods. The results were partially confirmed in the framework of field tests.

Keywords: Shock-absorption, dampening, SIMU, simulation, Python

Статья поступила в редакцию 04.05.2023
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.