

Отработка изделий ракетно-космической техники на динамические нагрузки, возникающие при переходных процессах

А.Ю. Бондаренко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Опыт летной эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) показывает, что наиболее интенсивное динамическое нагружение конструкции в нижнем частотном диапазоне реализуется при переходных процессах. Такие процессы происходят, например, при старте, при разделении ступеней ракет-носителей (РН), в различных нештатных ситуациях.

Уровень максимального динамического нагружения может быть весьма высок. Например, при выключении двигательной установки (ДУ) 3-й ступени РН «Союз» уровни перегрузок в приборном отсеке меняются от +3g до -4g. Такие процессы имеют выраженный нестационарный характер, их длительность достаточно коротка и не превышает 2-3 секунд, а степень затухания может быть значительна (логарифмический декремент до 0.3). Характерный вид нестационарного процесса, реализующегося при выключении ДУ, показан на рисунке 1.

Существуют различные подходы к наземной отработке на динамические воздействия подобного рода. Наиболее распространенным является замена нестационарного процесса на эквивалентное гармоническое нагружение конструкции с помощью вибростенда.

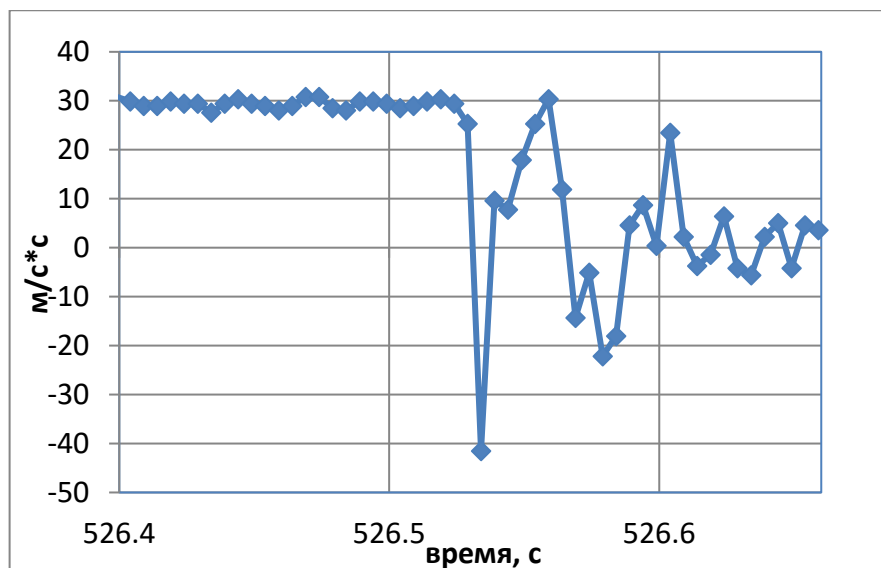


Рисунок 1 – ускорение приборного отсека РН «Союз» при выключении ДУ третьей ступени. Летные данные по запуску ТГК «Прогресс»

Под эквивалентностью при таком подходе подразумевается близость максимальных уровней динамического отклика составных частей конструкции при переходных процессах и гармонической вибрации. Отработка динамики переходных процессов, как правило, происходит в частотном диапазоне 5 – 100 Гц. Характерные огибающие эквивалентной синусоидальной вибрации в продольном и поперечном направлениях на интерфейсе космического аппарата (КА) представлены во всех справочниках РН [1,2] и служат ориентиром для разработчиков КА.

Определение эквивалентной гармонической вибрации (ESV) базируется на расчете ударного спектра SRS и его последующего деления на заданную добротность Q.

$$ESV(f) = \frac{SRS(f)}{Q}$$

Алгоритм вычисления ударного спектра подробно изложен в [3]. Большинство алгоритмов вычисления ударных спектров, встроенных в программные комплексы [4], хорошо работают лишь с центрированными процессами с нулевыми начальными условиями и достаточно мелким постоянными шагом по времени. В иных случаях автоматическое

применение таких алгоритмов приводит к сомнительным результатам ввиду весьма значительной погрешности.

Однако, как видно из рисунка 1, реальные переходные процессы зачастую характеризуются наличием траекторной перегрузки достаточно высокого уровня в начальный момент времени или после выхода на режим (при старте), а также ярко выраженной дискретностью записей. Обработка конструкций РКТ на траекторную перегрузку осуществляется отдельно, как на линейную нагрузку [5], поэтому траекторное ускорение необходимо каким-то способом выделять из зависимости полного ускорения от времени.

Учитывая все вышесказанное, становится понятна необходимость разработки собственных алгоритмов и программных средств для определения эквивалентной гармонической вибрации.

Зачастую, закон изменения внешнего воздействия, например, ветрового порыва или тяги ДУ, неизвестен. Поэтому универсальным способом обработки представляется применение низкочастотного (НЧ) фильтра к временной зависимости ускорения. Результаты выделения НЧ-составляющей перегрузки в этом случае показаны на рисунке 2. Другим способом обработки в случае, если известен закон изменения тяги по времени, может быть выделение траекторной (F/M) составляющей из исходного процесса.

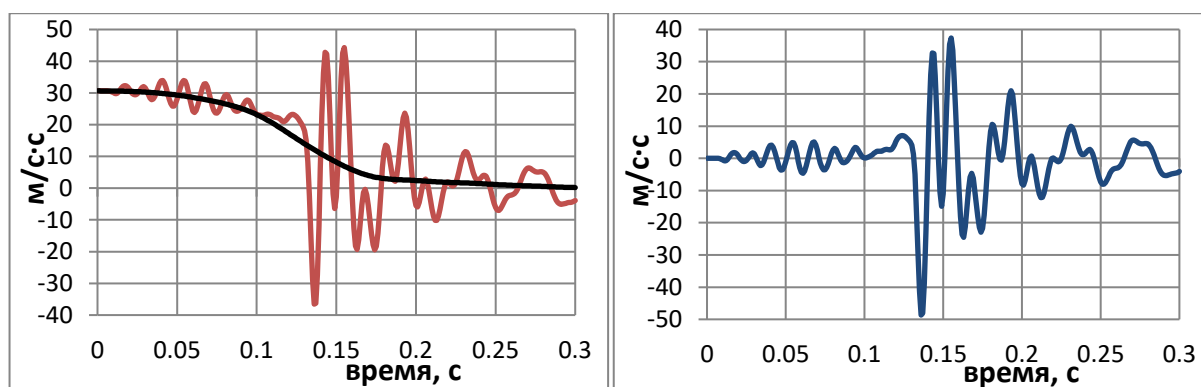


Рисунок 2 – исходный процесс, НЧ-составляющая и динамическая часть

Следует отметить, что такое выделение может привести к оценке чисто динамической составляющей не в запас, поскольку не будет учитываться отклик осцилляторов от исключенной составляющей. Однако, результаты расчетов [3] показывают, что применение НЧ фильтрации оставляет в

сохранности практически весь динамический отклик. При этом дополнительный динамический отклик от траекторной составляющей может достигать для некоторых частот 10% – 15% от полного. Величина добротности принималась равной $Q=10$, рассматривался частотный диапазон 10 – 100 Гц.

На основании вышесказанного может быть предложен единый подход к определению эквивалентной гармонической вибрации, основными этапами которого являются:

- фильтрация низкочастотной составляющей без фазового сдвига и ее вычитание из исходного процесса.
- Расчет ударного спектра полученной временной зависимости для заданного уровня добротности Q и определение эквивалентной вибрации для каждой частоты f из интересующего диапазона.

Данный подход был использован при моделировании условий нагружения конструкции типовой ступени РН, возникающих при выключении двигателя, в наземных условиях.

Для воспроизведения уровней эквивалентной синусоидальной вибрации в центральном шпангоуте приборного отсека, на котором измерялась продольная перегрузка, гармоническая сила (от вибростенда) была приложена в центры масс камер сгорания ДУ, ступень при этом была обезвешена. Зависимость входной силы от частоты была подобрана так, чтобы в центральном шпангоуте приборного отсека в точности реализовывался режим, соответствующий уровню эквивалентной синусоидальной вибрации.

При указанном гармоническом возбуждении (с использованием вибростенда) были расчетным путем определены условия нагружения (уровни синусоидальной вибрации) по сечениям ступени, а также в центрах масс приборов и агрегатов в приборном отсеке (FRESP).

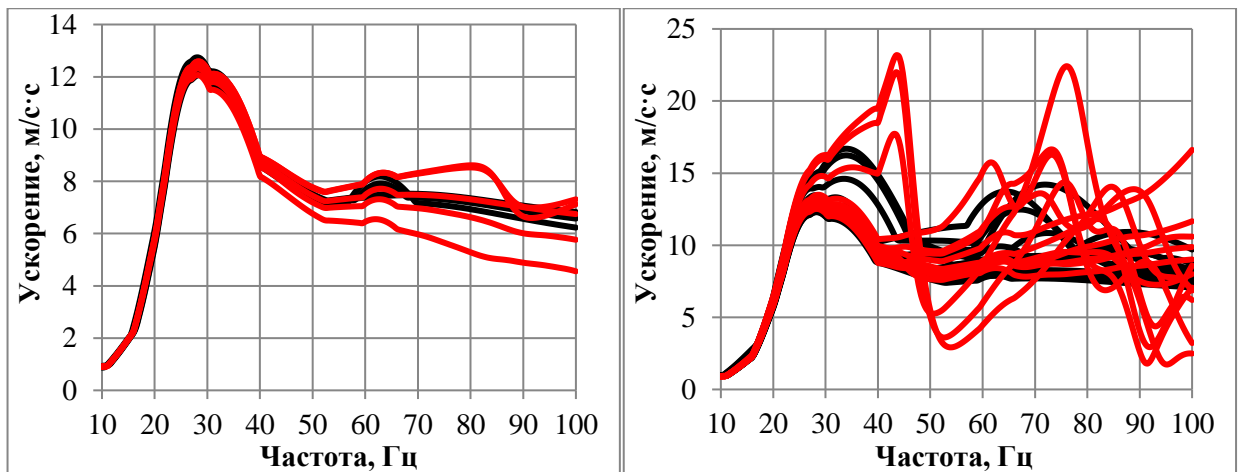


Рисунок 3 – Уровни синусоидальной вибрации, полученные расчетным путем от вибростенда (красная линия) и по переходным процессам (черная линия) по сечениям ступени (слева) и в центрах масс приборов и агрегатов в приборном отсеке ступени (справа)

На рисунке 3 приведено сопоставление уровней вибраций, определенных таким образом, с уровнями эквивалентной синусоидальной вибрации (ESV), рассчитанными через ударные спектры на основе временных процессов ускорений в тех же сечениях ступени и в центрах масс тех же приборов и агрегатов. Видно, что при испытаниях с использованием вибростенда достигается хорошее совпадение уровней эквивалентной синусоидальной вибрации от вибростенда и рассчитанных по переходным процессам на силовых элементах, однако на отдельных приборах и агрегатах в приборном отсеке есть риск превышения уровней перегрузок от вибростенда в $\sim 1.5 - 2$ раза. С увеличением добротности это превышение значительно увеличивается.

Другой подход к наземной отработке изделий РКТ на переходные процессы заключается в воспроизведении реальных переходных процессов. Предполагалось, что они могут быть адекватно воспроизведены при сбросе ступени с некоторой высоты. Для проведения бросковых испытаний использовался копрово-пружинный стенд, разработанный в ЦНИИмаш. Ступень закреплялась на динамической части стенда, оснащенной набором осцилляторов, которая затем сбрасывалась с некоторой высоты на неподвижную (статическую) его часть. Поскольку моделируемые

переходные процессы имеют две ярко выраженные частоты (~ 25 Гц и ~ 70 Гц), дополнительный набор осцилляторов с грузом, имитирующий полезную нагрузку, был прикреплен к верхнему шпангоуту ступени. Используемая математическая модель ступени включала в себя порядка 40000 элементов. При моделировании параметры выбирались так, чтобы достигнуть наилучшего совпадения уровней перегрузок в центральном шпангоуте приборного отсека (месте установки датчика) с реальными летными данными. Схематическое изображение ступени с динамической частью стенда показано на рисунке 4.

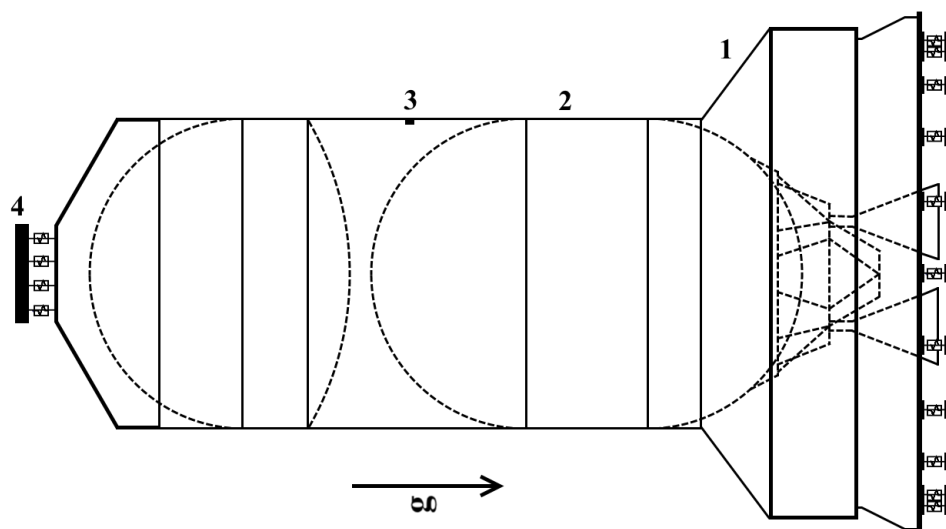


Рисунок 4 – Типовая ступень РН на копровом-пружинном стенде. 1 – динамическая часть стенда, 2 – ступень РН, 3 – место установки датчика осевой перегрузки, 4 – дополнительный набор осцилляторов с грузом.

На рисунке 5 слева приведено сравнение переходных процессов в центральном шпангоуте приборного отсека при выключении ДУ и при бросковых испытаниях. Справа на этом же рисунке приведено сравнение уровней эквивалентной синусоидальной вибрации, рассчитанных по переходным процессам в центральном шпангоуте приборного отсека, при выключении ДУ и при бросковых испытаниях.

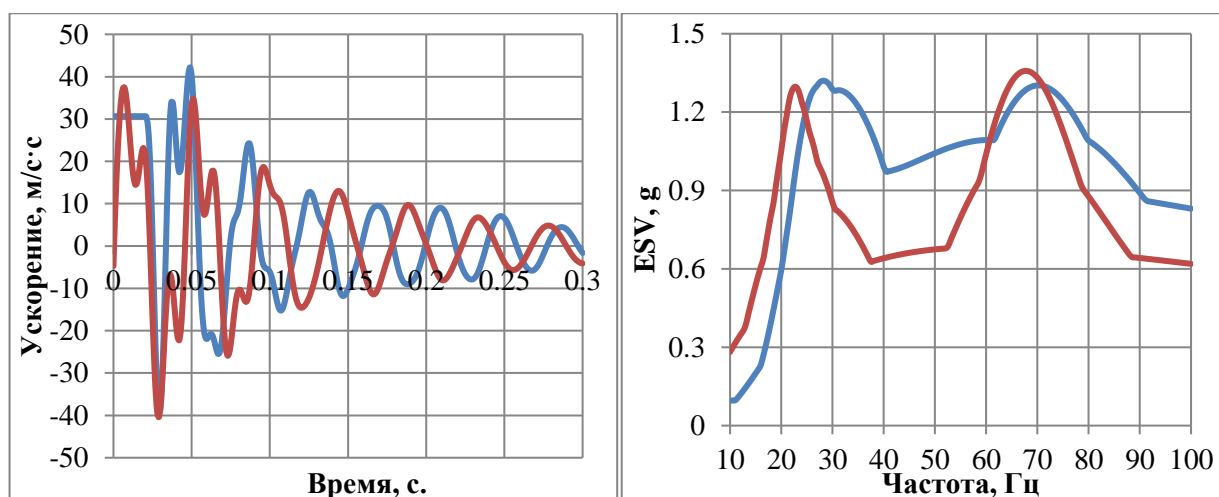


Рисунок 5 – переходные процессы (слева) и соответствующие уровни ESV (справа), в центральном шпангоуте приборного отсека при выключении ДУ (синяя линия) и при бросковых испытаниях (красная линия)

Как видно из рисунка 5, при проведении бросковых испытаний существует возможность удовлетворительного воспроизведения реальных переходных процессов. Стоит отметить, что при этом приемлемое согласование уровней перегрузок и соответствующих уровней эквивалентной синусоидальной вибрации достигается не только в месте установки датчика осевой перегрузки, но также в других сечениях ступени и в центрах масс приборов и агрегатов.

В заключение хочется сказать, что при создании новых изделий РКТ, по нашему мнению, целесообразнее экспериментальную отработку осуществлять по более консервативной методике – виброиспытаниям на эквивалентную синусоидальную вибрацию, поскольку это позволит в более полной мере выявить дефекты и несовершенства конструкции. Однако, если возникает необходимость проведения дополнительных испытаний (например – при обнаружении новых расчетных случаев для побывавших «в лёт» изделий) предлагаемый подход может быть более предпочтительным по двум причинам: во-первых, он позволяет не перегрузить конструкцию, и, во-вторых, он является более экономичным, поскольку не требует дорогого испытательного оборудования.

Литература

1. Справочник пользователя РН «Союз» (Soyuz user's manual ST-GTD-SUM-01, Issue 3, 2001)
2. Справочник пользователя РН «Протон-М» (Proton Launch System Mission Planner's Guide, LКЕВ-9812-1990 Issue 1 Revision 5, 2001)
3. Бондаренко А.Ю., Сидоров В.В. Методический подход к наземной отработке конструкций ракетно-космической техники при нагрузках, возникающих в результате переходных процессов. Космонавтика и ракетостроение, 2016, вып. 3(88)
4. MD NASTRAN. Dynamic analysis User's Guide. 2010. MSC.Software Corporation.
5. Кармишин А.В., Лиходед А.И., Паничкин Н.Г., Сухинин С.Н. Основы отработки прочности ракетно-космических конструкций. Москва. Машиностроение. 2007.

Ответственный – Бондаренко Андрей Юрьевич

[bondarenko.pk@gmail](mailto:bondarenko.pk@gmail.com), моб. 8-909-937-9239, раб. 8-495-513-55-64