

Влияние конструкции разделяемого узла стыка между сетчатыми композитными адаптером и корпусом космического аппарата на собственные частоты их колебаний

© А.А. Еременко, А.В. Азаров

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Сетчатые композитные конструкции широко применяют в ракетно-космической технике в качестве адаптеров полезной нагрузки и силовых конструкций корпусов (СКК) космических аппаратов. Для данных конструкций важным параметром, наравне с прочностными характеристиками, является минимальная собственная частота колебаний. В статье рассмотрена компоновка спутниковой платформы «Экспресс-1000», состоящая из композитного сетчатого адаптера и композитной сетчатой СКК космического аппарата с разделяемым стыком между ними. Исследовано влияние числа пирозамков и толщин шпангоутов на собственные формы колебаний сборочного узла адаптера и СКК. Расчет проведен методом конечных элементов с варьированием количества точек закрепления корпуса к адаптеру и толщины торцевых шпангоутов. Определены формы собственных колебаний и соответствующие им частоты. Используя полученные зависимости, можно установить рациональное количество точек закрепления и толщину шпангоутов СКК и адаптера.

Ключевые слова: сетчатые композитные конструкции, адаптер, композитный адаптер полезной нагрузки, корпус космического аппарата, собственные частоты, резонанс, закрепления

Введение. Современные космические аппараты (КА) строятся на базе единых космических платформ, центральным несущим элементом в которых является силовая конструкция корпуса (СКК). Она представляет собой цилиндрическую оболочку, воспринимающую все нагрузки, которые возникают при выведении аппарата на орбиту. Крепление КА к ракете-носителю осуществляется с помощью конического адаптера. Поскольку для этих конструкций важнейшим параметром является массовая эффективность, расширяется применение сетчатых конструкций [1–5], которые позволяют снизить массу по сравнению с массой классических оболочек, так как имеют большие удельную жесткость и прочность.

Из известных науке материалов именно однонаправленным волокнистым композитным материалам свойственны такие удельные характеристики, которые могут быть примерно на порядок выше, чем у металлов и их сплавов [4]. В частности, получили распространение однонаправленные углепластики. В сетчатых конструкциях наиболее полно используются преимущества анизотропных материалов из-за

большой схожести с ферменными конструкциями (в которых реализуется одноосное напряженное состояние).

Расчет сетчатых конструкций подразделяется на четыре этапа:

- 1) расчет на статическую прочность [1];
- 2) расчет на устойчивость [1, 5, 7];
- 3) расчет на местную устойчивость [1, 6] (устойчивость элементов ребер, находящихся между пересечениями с другими ребрами);
- 4) анализ собственных форм и частот [6–10].

Формы собственных колебаний и, соответственно, частоты зависят не только от геометрии и механических характеристик сетчатой структуры, но и от способа крепления СКК к адаптеру. Стык между адаптером и корпусом обычно является разделяемым. Типичный способ крепления (с возможностью последующего разделения) — с помощью пирозамков, рассмотрен в данной статье. Количество пирозамков ограничено, т. е. крепление происходит в отдельных точках. Чем больше замков используется, тем лучше с точки зрения минимальной собственной частоты. Однако это неоптимально с точки зрения надежности, поскольку для каждого пирозамка существует вероятность несрабатывания (а если КА не отделится от ракеты-носителя в результате такого сбоя, запуск не будет успешным).

Еще одним фактором, оказывающим значительное влияние на собственные частоты колебаний конструкции, является изгибная жесткость торцевых шпангоутов на стыке адаптера и СКК. Основной геометрический параметр, определяющий изгибную жесткость шпангоута, — его толщина.

Цель работы — исследовать влияние числа пирозамков и толщин стыковочных шпангоутов на собственные частоты колебаний сборочного узла из СКК и адаптера.

Постановка задачи. Рассмотрена компоновка платформы «Экспресс-1000» [11], которая состоит из композитного сетчатого адаптера и композитной сетчатой СКК космического аппарата. Параметры, характерные для аппаратов, построенных на этой платформе, приведены ниже:

Силовая конструкция корпуса

| | |
|---------------------------|------|
| Диаметр, мм | 1192 |
| Длина, мм | 2500 |
| Спиральные ребра: | |
| размер ребра, мм | 5×16 |
| число пар | 48 |
| угол наклона, град | 15 |
| Кольцевые ребра, мм | 3×16 |

Адаптер

| | |
|---------------|------|
| Диаметр, мм: | |
| верхний | 1200 |
| нижний | 2050 |

| | |
|--|------|
| Высота, мм | 650 |
| Спиральные ребра: | |
| размер ребра, мм | 6×20 |
| число пар | 48 |
| угол наклона на нижнем стыке, град | 16 |
| Кольцевые ребра, мм | 3×20 |

Все четыре шпангоута (по два у СКК и у адаптера), выполненные из алюминиевого сплава В95, имеют прямоугольный профиль размерами 20 × (10...35) мм (в расчетных случаях высота варьируется от 10 мм до 35 мм). Ребра сетчатой структуры изготовлены из однонаправленного углепластика на основе волокон Umatex UMT-430 и эпоксидного связующего ЭХД-МД. Физико-механические характеристики материалов, использованные в расчете, приведены ниже.

Физико-механические характеристики материала ребер

| | |
|---|------|
| Модуль упругости вдоль ребра E_1 , ГПа | 160 |
| Модуль упругости вдоль высоты ребра E_2 , ГПа | 6,5 |
| Модуль сдвига G_{12} , ГПа | 3 |
| Модуль сдвига G_{23} , ГПа | 2 |
| Коэффициент Пуассона μ_{12} | 0,19 |
| Прочность при сжатии вдоль ребра σ_{-1} , МПа | 480 |
| Прочность при растяжении вдоль ребра σ_1 , МПа | 800 |

Физико-механические характеристики алюминиевого сплава В95

| | |
|--|-------|
| Модуль упругости E , ГПа | 71 |
| Коэффициент Пуассона μ | 0,3 |
| Предел прочности [σ_b], МПа | 423,8 |

Примечание. В прочности сплава В95 учтено 20%-ное снижение характеристик материала в результате термообработки корпуса.

Полезная нагрузка имитируется сосредоточенной массой 2000 кг, расположенной на расстоянии 0,55 м от верхнего шпангоута СКК на оси симметрии.

Методы и допущения. Расчеты были проведены методом конечных элементов в программном комплексе Femap with NX Nastran. Ребра сетчатой структуры моделировали балочными элементами СВЕАМ, участки ребер между узлами из пересечения разбивали на четыре элемента.

В реальной конструкции (на стыке СКК и адаптера) шпангоуты находятся в непосредственном контакте друг с другом, нагрузка между ними передается только в сжатой зоне. При динамических нагрузках, действующих на систему, расположение и размеры этой сжатой зоны являются переменными, в связи с чем при расчете был

рассмотрен худший случай, при котором шпангоут СКК не опирается на шпангоут адаптера по контуру, а прикреплен к нему только в отдельных зонах, соответствующих местам установки пирозамков. Такая схема наиболее показательна, в этом случае увеличивается влияние закреплений на собственные колебания, что и является предметом изучения. Для реализации этой расчетной схемы в модели между шпангоутами был предусмотрен зазор, а замки, соединяющие шпангоуты, моделировали жесткими элементами RBE2.

Результаты расчета. Полученные в ходе расчетов зависимости собственных частот колебаний конструкции от числа замков и толщины торцевых шпангоутов адаптера и СКК приведены в таблице.

Результаты расчетов собственных частот колебаний конструкции, Гц, в зависимости от числа замков и толщины шпангоута

| Толщина шпангоута, мм | Число замков | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 4 | 6 | 8 | 12 | 16 | 24 | 48 |
| <i>1-я собственная частота, Гц</i> | | | | | | | | |
| 10 | 2,358 | 2,710 | 3,533 | 4,572 | 5,886 | 6,546 | 7,235 | 7,948 |
| 25 | 2,941 | 3,362 | 4,520 | 5,686 | 6,906 | 7,502 | 8,059 | 8,346 |
| 30 | 3,129 | 3,568 | 4,832 | 6,000 | 7,171 | 7,728 | 8,189 | 8,406 |
| 35 | 3,311 | 3,767 | 5,127 | 6,280 | 7,397 | 7,902 | 8,281 | 8,452 |
| <i>2-я собственная частота, Гц</i> | | | | | | | | |
| 10 | 2,358 | 2,710 | 3,533 | 4,572 | 5,886 | 6,546 | 7,235 | 7,948 |
| 25 | 2,941 | 3,362 | 4,520 | 5,686 | 6,906 | 7,502 | 8,059 | 8,346 |
| 30 | 3,129 | 3,568 | 4,832 | 6,000 | 7,171 | 7,728 | 8,189 | 8,407 |
| 35 | 3,311 | 3,767 | 5,127 | 6,280 | 7,397 | 7,902 | 8,281 | 8,452 |
| <i>3-я собственная частота, Гц</i> | | | | | | | | |
| 10 | 16,16 | 18,38 | 25,61 | 32,99 | 42,18 | 46,91 | 51,91 | 57,05 |
| 25 | 19,82 | 22,73 | 32,78 | 40,90 | 49,47 | 53,78 | 57,83 | 59,90 |
| 30 | 20,91 | 24,19 | 35,00 | 43,12 | 51,38 | 55,42 | 58,77 | 60,33 |
| 35 | 21,93 | 25,65 | 37,09 | 45,09 | 53,01 | 56,68 | 59,44 | 60,67 |
| <i>4-я собственная частота, Гц</i> | | | | | | | | |
| 10 | 66,9 | 110,3 | 120,0 | 124,2 | 127,4 | 128,5 | 129,5 | 130,5 |
| 25 | 77,8 | 119,1 | 121,7 | 126,7 | 129,0 | 129,8 | 130,4 | 130,8 |
| 30 | 80,3 | 120,5 | 122,4 | 127,3 | 129,4 | 130,0 | 130,5 | 130,8 |
| 35 | 82,4 | 121,5 | 123,1 | 127,9 | 129,6 | 130,2 | 130,6 | 130,9 |
| <i>5-я собственная частота, Гц</i> | | | | | | | | |
| 10 | 80,9 | 110,3 | 125,7 | 124,2 | 127,4 | 128,5 | 129,5 | 130,5 |
| 25 | 92,0 | 119,1 | 128,1 | 126,7 | 129,0 | 129,8 | 130,4 | 130,8 |
| 30 | 94,6 | 120,5 | 128,6 | 127,3 | 129,4 | 130,0 | 130,5 | 130,8 |
| 35 | 96,8 | 121,5 | 128,9 | 127,9 | 129,6 | 130,2 | 130,6 | 130,9 |

Анализ результатов расчета. На основе приведенных в таблице данных получены зависимости 1-й собственной частоты колебаний, представленные на рис. 1.

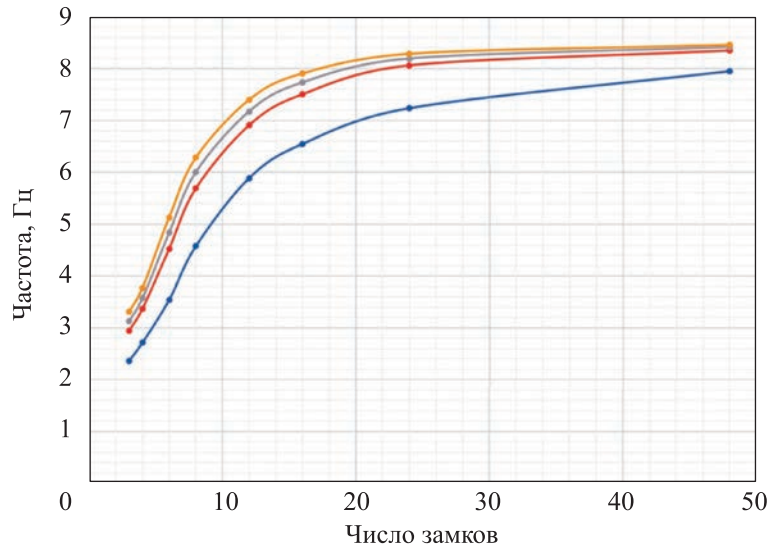


Рис. 1. Графики зависимостей 1-й собственной частоты колебаний от числа замков для шпангоутов различной толщины:

— 10 мм; — 25 мм; — 30 мм; — 35 мм

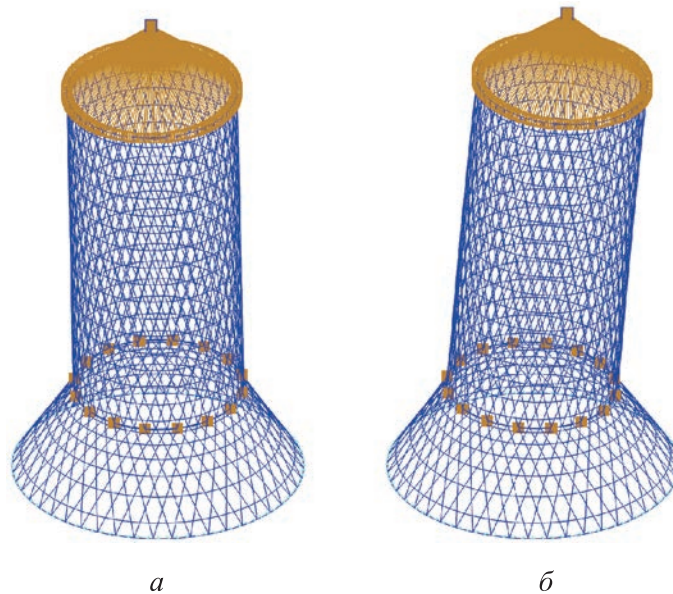


Рис. 2. Первая (а) и вторая (б) формы собственных колебаний при толщине шпангоута 35 мм и 16 замках

При сравнении приведенных в таблице данные для первых пяти частот колебаний можно увидеть, что результаты для первых двух собственных частот совпадают как минимум с точностью до второго знака после запятой. Кроме того, формы собственных колебаний, показанные на рис. 2, также схожи, т. е., в сущности, их можно считать одной формой изгибных колебаний. По мере увеличения числа замков наблюдается стремление 1-й собственной частоты к горизонтальной асимптоте (см. рис. 1), причем все графики стремятся к одной и той же асимптоте, что логично: ведь чем больше количество креплений, тем меньше влияние изгибной жесткости шпангоутов (формостабильность шпангоутов все больше обеспечивается посредством закреплений).

В данном случае максимальное рассмотренное число замков — 48, что соответствует числу пар ребер исследуемой сетчатой конструкции, поскольку дальнейшее увеличение количества ребер технически трудно осуществимо.

Следует отметить, что значительного роста рассматриваемой характеристики не наблюдается уже после 12–16 закреплений (приведем результаты для первой собственной частоты при толщине шпангоутов 35 мм):

- 1) при увеличении числа с 12 до 48 (в 4 раза) собственная частота повышается менее чем на 15 %;
- 2) при увеличении числа с 16 до 48 (в 3 раза) собственная частота повышается менее чем на 2,1 %;
- 3) при увеличении числа с 12 до 16 (в 1,33 раза) собственная частота повышается менее чем на 7 %.

Таким образом, с практической точки зрения использовать более 16 замков неэффективно.

Зависимости 3-й собственной частоты (рис. 3) по виду схожи с двумя первыми (см. рис. 1), однако 3-я форма не является «парной», она обуславливается продольными колебаниями (рис. Рис. 4).

Уже при шести–восьми точках закрепления 4-я и 5-я собственные частоты (рис. 5 и 6) принимают значения, близкие к максимальным. В случае превышения указанного числа замков шпангоуты практически не деформируются, а собственные формы колебаний обуславливаются только деформацией ребер сетчатой структуры (рис. 7).

При анализе реальных конструкций такого типа эти формы собственных колебаний можно не рассматривать, так как соответствующие им частоты достаточно велики и динамические нагрузки, действующие в этом диапазоне частот, значительно меньше, чем для диапазонов более низких частот, в связи с чем разрушение конструкции маловероятно.

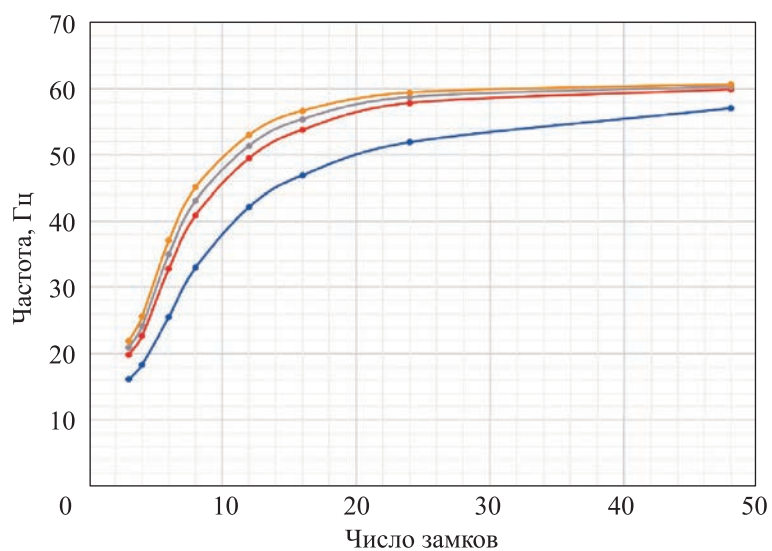


Рис. 3. Графики зависимости 3-й собственной частоты колебаний от числа замков для шпангоутов различной толщины:
— 10 мм; — 25 мм; — 30 мм; — 35 мм

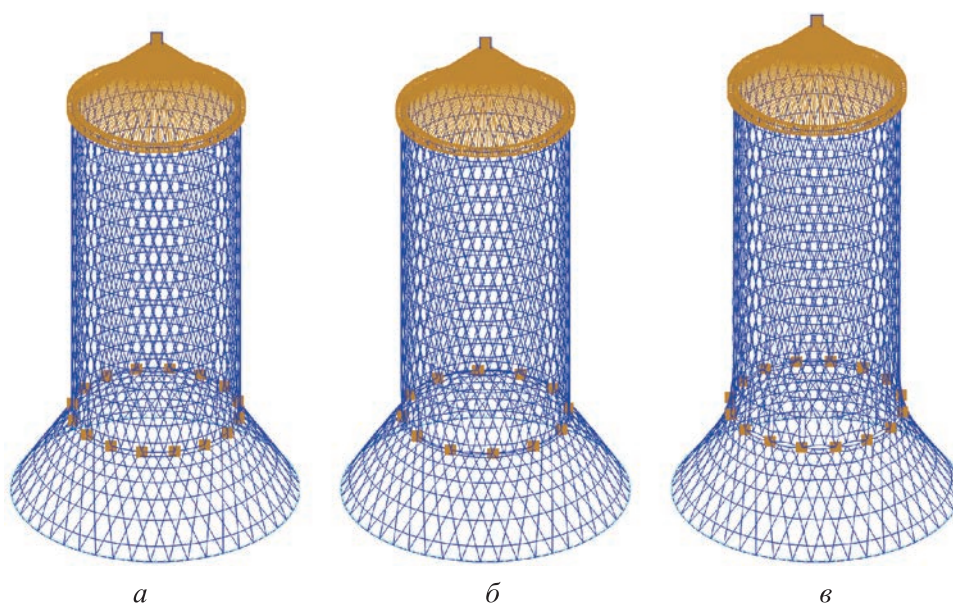


Рис. 4. Формы собственных колебаний шпангоутов толщиной 35 мм для случаев применения 16 (а, в) и 12 (б) замков:
а — недеформированный вид; б, в — третья форма собственных колебаний

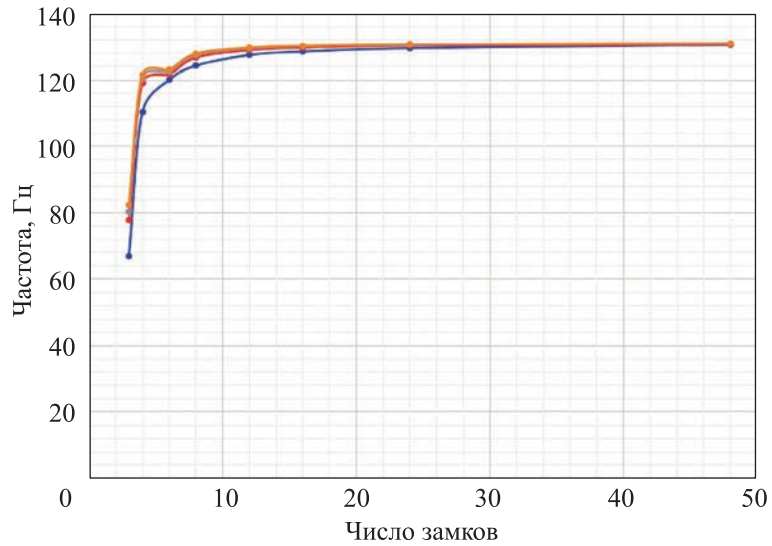


Рис. 5. Графики зависимости 4-й собственной частоты колебаний от числа замков для шпангоутов различной толщины:
— 10 мм; — 25 мм; — 30 мм; — 35 мм

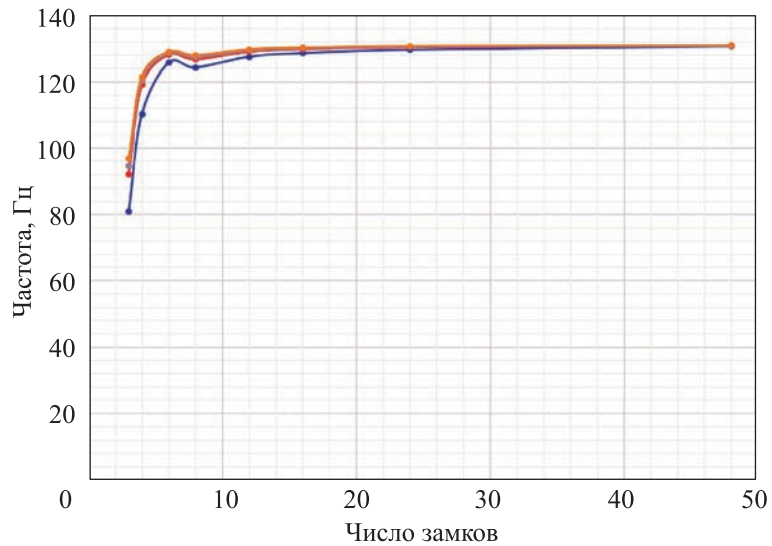


Рис. 6. Графики зависимости 5-й собственной частоты колебаний от числа замков для шпангоутов различной толщины:
— 10 мм; — 25 мм; — 30 мм; — 35 мм

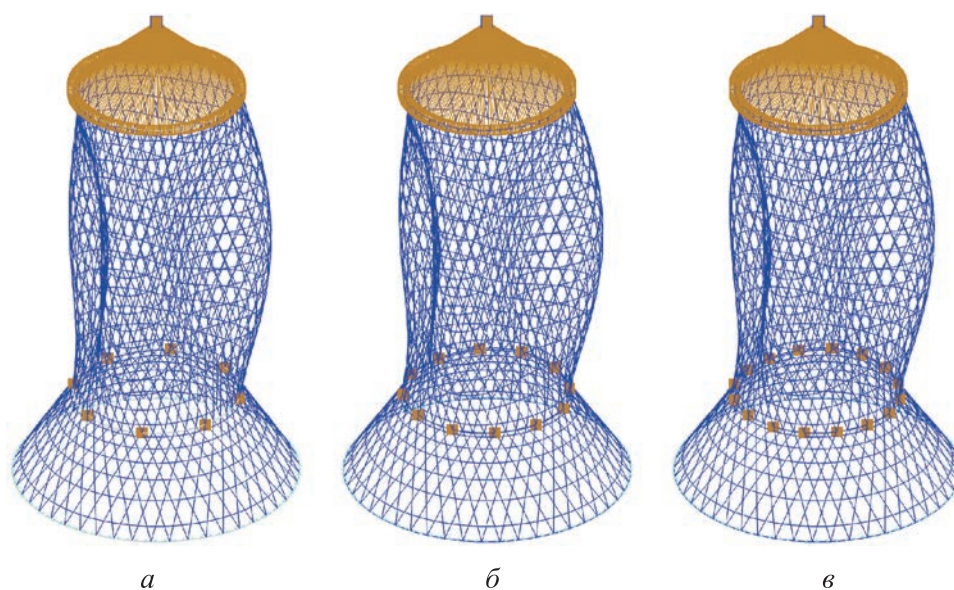


Рис. 7. Пятая форма собственных колебаний шпангоутов толщиной 35 мм для случаев закреплений:
a — 8 замков; *б* — 12 замков; *в* — 16 замков

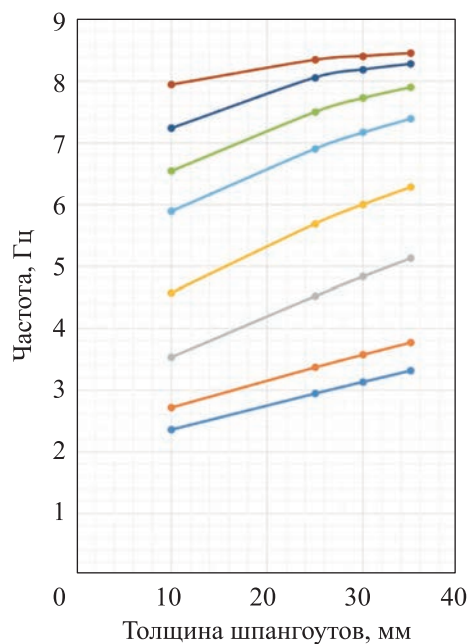


Рис. 8. Графики зависимости 1-й собственной частоты колебаний от толщины шпангоутов для различного числа замков: 3 (—), 4 (—), 6 (—), 8 (—), 12 (—), 16 (—), 24 (—), 48 (—)

Зависимости 1-й собственной частоты колебаний от толщины шпангоутов для различного числа замков показаны на рис. 8. Как следует из рисунка, толщина шпангоутов практически линейно влияет на 1-ю собственную частоту.

Заключение. В ходе проведения исследования были получены зависимости, характеризующие влияние числа пирозамков на стыке адаптера и СКК космического аппарата и толщин стыковочных шпангоутов на собственные частоты колебаний конструкции. Установлено, что наибольшее влияние на первые частоты колебаний оказывает число пирозамков — при увеличении их с трех до восьми 1-я собственная частота колебаний возрастает в 2 раза. Если замков более 12, дальнейшее увеличение их числа слабо влияет на собственную частоту. Таким образом, рациональное число пирозамков лежит в диапазоне от 8 до 12.

Частота собственных частот колебаний также линейно зависит от толщины стыковочных шпангоутов: для числа закреплений от 3 до 8 увеличение толщины с 20 мм до 35 мм в среднем приводит к повышению 1-й собственной частоты на 20,7 %, а для числа закреплений от 12 до 16 — на 12,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И. Анизотридные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложение к космической лекции. *Композиты и наноструктуры*, 2009, № 3, с. 38–50.
- [2] Азаров А.В. Проблема проектирования аэрокосмических сетчатых композитных конструкций. *Механика твердого тела*, 2018, № 4, с. 85–93.
- [3] Giusto G., Totaro G., Spina P., De Nicola F., Di Caprio F., Zallo A., Grilli A., Mancini V., Kiryenko S., Das S., Mespoulet S. Composite grid structure technology for space applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 34 (1), pp. 332–340.
- [4] Farhadi Nia M., Namdaran N., Jam J.E., Zamani M., Yaghobizadeh O., Gharouni S.M. Analysis investigation of composite lattice conical shell as satellite carrier adapter for aerospace applications. *International Journal of Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, vol. 1 (4), pp. 40–51.
- [5] Dan Wang, Mostafa M. Abdalla, Weihong Zhang. Buckling optimization design of curved stiffeners for grid-stiffened composite structures. *Composite Structures*, 2017, vol. 159 (1), pp. 656–666.
- [6] Хахленкова А.А., Лопатин А.В. Обзор конструкций адаптеров современных космических аппаратов. *Ракетно-космическая техника*, 2018, № 2 (3), с. 134–146.
- [7] Хахленкова А.А. Сетчатая цилиндрическая оболочка с круглым поперечным сечением и переменной жесткостью. *Вестник СибГАУ*, 2016, № 4, с. 1028–1036.
- [8] *Soyuz User's Manual. Iss. 3, Revision 0*, April, 2001. URL: http://www.starsem.com/services/images/soyuz_users_manual_190401.pdf (дата обращения: 05.10.2022).

- [9] *Soyuz User's Manual. Iss. 2, Revision 0*, March, 2012. URL: <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/09/Soyuz-Users-Manual-March-2012.pdf> (дата обращения: 05.10.2022).
- [10] *Proton Launch System Mission Planner's Guide. Revision 7*, October, 2009. URL: <https://www.ilslaunch.com/wp-content/uploads/pdf/PMPG%20Section%202.pdf> (дата обращения: 05.10.2022).
- [11] Ермолаев В.И., Белов В.П., Евстафьев В.А., Калягин Н.И., Матвеев Н.К., Попов В.В., Семенов А. А, Ходосов В.В. *Спутниковая платформа «Экспресс-1000»*. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2015, 7 с.

Статья поступила в редакцию 28.11.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Еременко А.А., Азаров А.В. Влияние конструкции разделяемого узла стыка между сетчатыми композитными адаптером и корпусом космического аппарата на собственные частоты их колебаний. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-12-2237>

Еременко Александр Андреевич — студент, кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: расчет и проектирование композитных сетчатых конструкций. e-mail: eremenko.science@gmail.com

Азаров Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: расчет и проектирование композитных сетчатых конструкций, трехмерная печать изделий из композитов. e-mail: avazar@bk.ru

Influence of the design of a separable junction between the grid composite adapter and the spacecraft hull on their natural oscillation frequencies

© A.A. Eremenko, A.V. Azarov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Grid composite structures are widely used in rocket and space technology as the payload adapters and the hull load-bearing structures (HLBS) of a spacecraft. An important parameter for these structures, along with the strength characteristics, is the minimum natural oscillation frequency. The article considers layout of the Express-1000 satellite platform consisting of a grid composite adapter and the spacecraft grid composite HLBS with a separable junction between them. The paper studies the influence of the number of pyro-locks and the thickness of the frames on the natural oscillation modes of the adapter and the HLBS assembly. Calculation was carried out by the finite element method, the number of fixing points of the hull to the adapter and the thickness of the end frames were varying, and the forms of natural oscillations and their corresponding frequencies were determined. Using the obtained dependences, it becomes possible to determine the rational number of fixing points and the thickness of the HLBS and the adapter.

Keywords: grid composite structures, adapter, payload composite adapter, spacecraft hull, natural frequencies, resonance, fixings

REFERENCES

- [1] Vasiliev V.V., Barynin V.A., Razin A.F., Petrokovsky S.A., Halimanovich V.I. Anizogridnye kompozitnye setchatye konstruksii — razrabotka i prilozhenie k kosmicheskoy leksii [Anisogrid composite mesh structures: development and application to space lecture]. *Kompozity i nanostruktury — Composites and Nanostructures*, 2009, no.3, pp. 38–50.
- [2] Azarov A.V. Problema proektirovaniya aerokosmicheskikh setchatykh kompozitnykh konstruksiy [Design problem of aerospace mesh composite structures]. *Mekhanika tverdogo tela — Mechanics of Solids*, 2018, no. 4, pp. 85–93.
- [3] Giusto G., Totaro G., Spina P., De Nicola F., Di Caprio F., Zallo A., Grilli A., Mancini V., Kiryenko S., Das S., Mespoulet S. Composite grid structure technology for space applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 34 (1), pp. 332–340.
- [4] Farhadi Nia M., Namdaran N., Jam J. E., Zamani M., Yaghobizadeh O., Gharouni S.M. Analysis investigation of composite lattice conical shell as satellite carrier adapter for aerospace applications. *International Journal of Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, vol. 1 (4), pp. 40–51.
- [5] Dan Wang, Mostafa M. Abdalla, Weihong Zhang. Buckling optimization design of curved stiffeners for grid-stiffened composite structures. *Composite Structures*, 2017, vol. 159 (1), pp. 656–666.
- [6] Khakhlenkova A.A., Lopatin A.V. Obzor konstruksiy adapterov sovremennykh kosmicheskikh apparatov [Overview of adaptor designs for modern spacecrafts]. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika — Rocket and Space Engineering*, 2018, no. 2 (3), pp. 134–146.
- [7] Khakhlenkova A.A. Setchataya tsilindricheskaya obolochka s kruglym poperechnym secheniem i peremennoy zhestkostiu [Lattice cylindrical shell

- with a round transverse profile and variable stiffness]. *Vestnik SibSAU*, 2016, no. 4, pp. 1028–1036.
- [8] *Soyuz User's Manual. Iss. 3, Revision 0, April, 2001*. Available at: http://www.starsem.com/services/images/soyuz_users_manual_190401.pdf (accessed October 5, 2022).
- [9] *Soyuz User's Manual. Iss. 2, Revision 0, March, 2012*. Available at: <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/09/Soyuz-Users-Manual-March-2012.pdf> (accessed October 5, 2022).
- [10] *Proton Launch System Mission Planner's Guide. Revision 7, October, 2009*. Available at: <https://www.ilslaunch.com/wp-content/uploads/pdf/PMPG%20Section%202.pdf> (accessed October 5, 2022).
- [11] Ermolaev V.I., Belov V.P., Evstafyev V.A., Kalyagin N.I., Matveev N.K., Popov V.V., Semenov A.A., Khodosov V.V. *Sputnikovaya platforma "Ekspress-1000"* [Satellite platform "Express-1000"]. Saint Petersburg, BSTU VOENMEKH Publ., 2015, 7 p.

Eremenko A.A., Student, Department of Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: calculation and design of composite grid structures. e-mail: eremenko.science@gmail.com

Azarov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: calculation and design of composite grid structures, 3D printing of products and composites. e-mail: avazar@bk.ru