

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЖЕНИЯ БЛОКОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ «СОЮЗ-СТ» В МЕСТАХ ИХ ОПИРАНИЯ ПРИ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

© 2009 С. В. Широков

ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Описывается морская транспортировка блоков РН. Предлагается математическая модель, описывающая зависимость нагрузок на блоках РН в местах опирания от вертикальных перемещений судна, приводятся основные характеристики морского волнения и определяются закономерности, описывающие вертикальные перемещения точки судна при морском волнении как случайный процесс.

Ракеты-носители, транспортировка, жесткость, податливость, морское волнение, перегрузка, спектральная плотность, дисперсия.

В настоящее время российской и европейской сторонами проводятся работы по созданию в Гвианском космическом центре комплекса системы запуска ракеты-носителя «Союз-СТ» с различными полезными нагрузками. Ракета включает в себя блок III ступени и блок I-II ступеней («пакет»), который в свою очередь состоит из центрального блока (блок «А») и четырёх боковых блоков (блоки «Б», «В», «Г», «Д»). Конструктивно центральный блок разделяется на два подблока («А1» и «А2»).

Доставку РН «Союз-СТ» в Гвианский космический центр планируется осуществлять поблочно в контейнерах с применением железнодорожного, морского и автомобильного транспорта.

Транспортирование блоков ракеты-носителя типа «Союз» с завода-изготовителя на космодромы до настоящего времени осуществлялось исключительно железнодорожным транспортом. Создание ракеты-носителя также осуществлялось с учетом обеспечения заданных прочностных характеристик при таком способе транспортирования.

Транспортирование блоков морским и автомобильным транспортом планируется осуществлять впервые, при этом продолжительность транспортирования морским транспортом будет составлять около 14 суток, транспортирование автомобильным транспортом – порядка нескольких часов.

Введение продолжительной морской транспортировки для блоков ракеты-носителя

вызывает необходимость проведения дополнительных исследований в части возможности сохранения ими заданных прочностных характеристик. Для выполнения этой задачи требуется определение и формирование данных по воздействиям, которые блоки ракеты-носителя воспринимают в местах их опирания со стороны ступеней и кронштейнов крепления в транспортировочных контейнерах при перевозке морем.

Вышеуказанные воздействия на блоки ракеты-носителя при морском транспортировании возникают от различных факторов. В первую очередь, от морского волнения, то есть качки судна, ветрового воздействия, ударов волн и т.д. Во вторую очередь, на блоки могут воздействовать также нагрузки, вызываемые колебаниями судна от работы двигателя корабля и т.д. Перечисленные выше факторы имеют случайный характер, что в свою очередь требует рассмотрения данного вопроса с точки зрения теории случайных процессов.

Транспортирование блоков РН осуществляется в специальных контейнерах, которые сначала устанавливают на ж/д платформы и перевозят до морского порта в Санкт-Петербурге. Далее контейнеры с блоками РН устанавливают на специальные передвижные платформы на колесном ходу, которые, в свою очередь, при выставлении их в определенное место на борту судна поддомкрачиваются и закрепляются растяжками. После чего осуществляется морская транспортировка в порт во

Французской Гвиане, где по прибытию контейнеры переключаются и доставляются на технический комплекс автомобильным транспортом.

Установка и закрепление изделия в транспортировочных контейнерах производится на двух (неподвижной и подвижной) опорах, представляющих ферменные конструкции, устанавливаемые на основание контейнера.

Неподвижная опора воспринимает нагрузки по осям X , Y , Z . Подвижная опора воспринимает нагрузки по осям Y , Z и обеспечивает температурные перемещения изделия по оси X . Удлинение (укорочение) изделия при перепаде температур во время транспортировки составляет до 15 мм.

Для контейнера принимается прямоугольная система координат. Ось X расположена в горизонтальной плоскости и совпадает с направлением движения при транспортировании, ось Y направлена по вертикали вверх, ось Z перпендикулярна осям X , Y и образует с ними правую систему координат.

В основании корпуса контейнера предусмотрены места (пластины) для установ-

ки и крепления опор изделия. Типовые схемы установки и зоны опор блоков изделия в корпусах контейнеров приведены на рисунках 1, 2.

Для формирования математической модели системы крепления блоков воспользуемся упрощенной схемой «платформа-контейнер-изделие», представленной на рисунке 3.

Представленные на схеме элементы: платформу, основание контейнера с опорами – можно изобразить в виде технологической системы, каждый из элементов которой представлен сосредоточенными упругими звеньями – пружинами и демпферами [1].

Рассмотрим данную систему с точки зрения вертикальных колебаний.

С позиции теории управления каждый элемент системы можно представить в виде звена, в котором за входную величину принимается нагрузка P_y , а за выходную – перемещение g_y [2]. Структурная схема эквивалентной упругой системы представлена на рисунке 4.

Для определения характеристик свойств технологической системы и ее эле-



Рис. 1. Типовая схема опирания для блоков «А» и III ступени

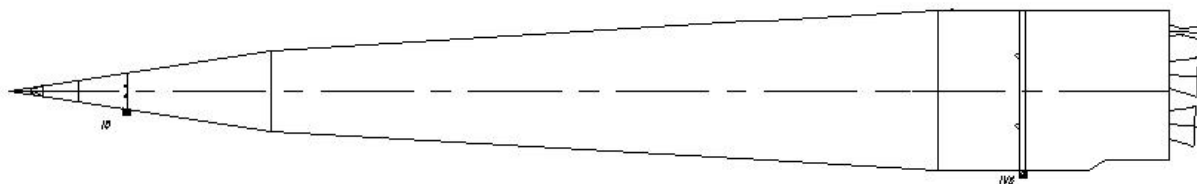


Рис. 2. Типовая схема опирания для блоков «Б», «В», «Г», «Д»

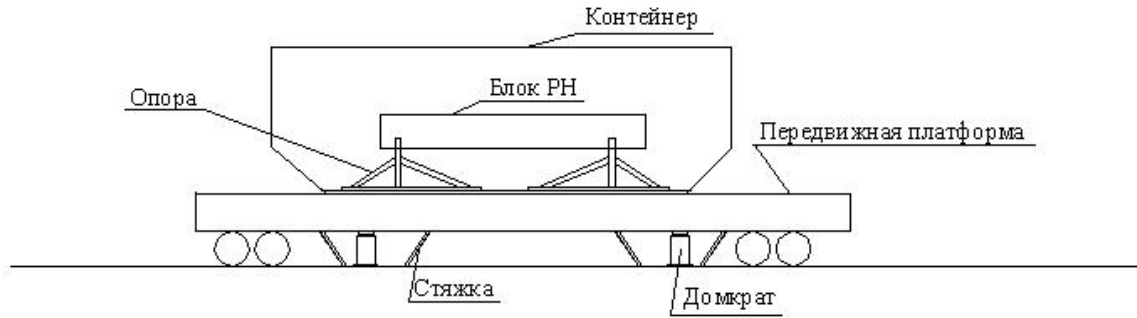


Рис. 3. Упрощенная схема «платформа-контейнер-изделие»

ментов по координате Y введем понятие жесткости и податливости по этой координате.

$$J_y = \frac{P_y}{g_y} \quad - \text{ жесткость системы;} \quad (1)$$

$$h_y = \frac{g_y}{P_y} \quad - \text{ податливость системы.} \quad (2)$$

При рассмотрении динамических характеристик данной технологической системы свойства каждого отдельного элемента в переходных режимах могут быть описаны передаточной функцией колебательных звеньев [3]:

$$H_i(p) = \frac{Dg_i(p)}{DP_i(p)} = \frac{h_i}{T_i^2 p^2 + 2e_i T_i p + 1}, \quad (3)$$

где h_i - податливость (коэффициент передачи) i -го звена, T_i , e_i - постоянная времени и коэффициент демпфирования i -го звена. Здесь силы P_i , действующие на отдельные элементы, и соответствующие перемещения g_i рассматриваются как векторные переменные.

Исходя из формулы (3), перемещение точек С и В можно определить как величину упругой деформации для 1-го звена по формуле

$$Dg_1(p) = H_1(p) P_1(p). \quad (4)$$

В свою очередь для звена 1 силу P_1 можно определить как функцию от вертикального ускорения точки А в виде произведения вертикального ускорения, с которым движет-

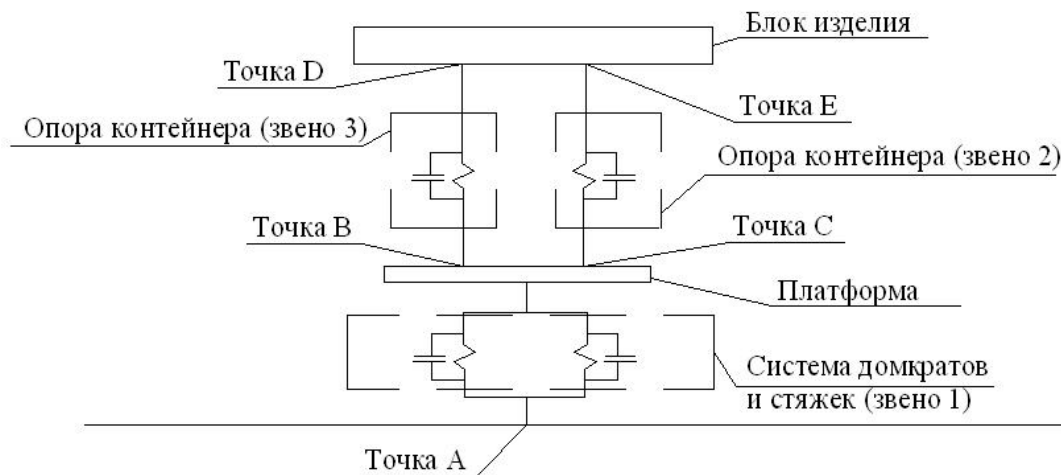


Рис. 4. Структурная схема эквивалентной упругой системы

ся точка А на сумму масс платформы с контейнером, блока изделия и опор контейнера (звенья 2 и 3):

$$P_1 = (m_2 + m_3 + m_{ae}) \ddot{z}_A, \quad (5)$$

где m_2 , m_3 – массы 2-го и 3-го звена, m_{ae} – масса блока, $\ddot{z}_A$ – ускорение вертикального перемещения точки А.

С помощью формул (4) и (5) можно определить перемещение точек С и В в виде функции от ускорения вертикального перемещения точки А:

$$Dg_1(p) = F(\ddot{z}_A). \quad (6)$$

Аналогично перемещения точек D и E для звеньев 2 и 3 можно записать как функции от ускорений вертикального перемещения точек В и С, при этом определение ускорения в данных точках необходимо осуществлять с учетом деформации 1-го звена.

Для исследования с помощью полученных передаточных функций величин перегрузок, возникающих в опорах изделия, необходимо определить ускорение вертикальных перемещений в точке А, которое, в свою очередь, определяется интенсивностью морского волнения.

Для определения вертикального ускорения перемещения точки А (рис. 4) рассмотрим основные параметры морского волнения

и его влияния на колебание судна [4].

Волнение представляет собой процесс колебания морской поверхности.

Основными для рассматриваемой задачи характеристиками морского волнения являются:

- волновая ордината r – вертикальное расстояние от любой точки профиля волны до линии невозмущенного уровня моря (рис. 5);

- угол ветрового склона α – угол между касательной к профилю волны и горизонтальной плоскостью.

Нерегулярность и определенная хаотичность взволнованной поверхности моря дают основание рассматривать ее как случайное поле. В данном случае волновую ординату в точке пространства считают случайным стационарным процессом. Для частотной характеристики плоского нерегулярного волнения как случайного стационарного процесса используем функцию спектральной плотности волновых ординат $S_r(w)$ (энергетический спектр), представляющую распределение энергии волнения по различным частотам. Эту функцию также называют волновым спектром.

Для определения закономерности, описывающей параметры вертикального перемещения точки корпуса на встречном волнении, используем схему, представленную на рисунке 6.

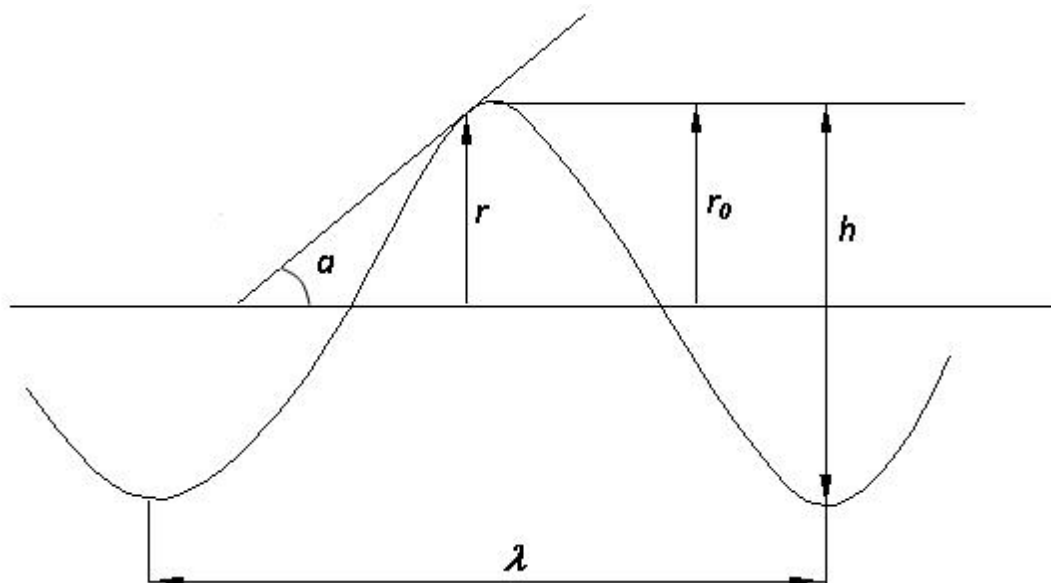


Рис. 5. Профиль морской волны

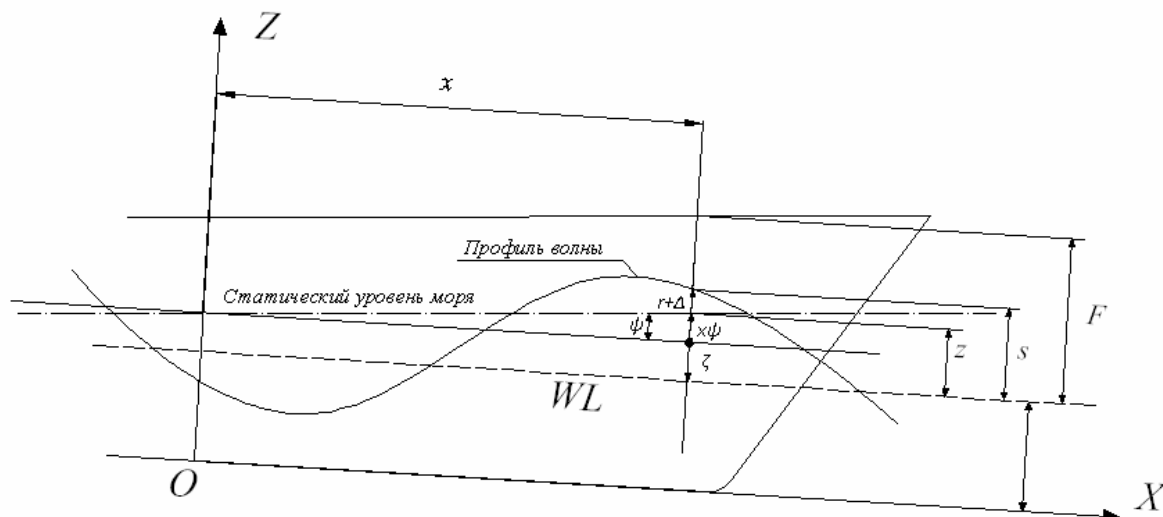


Рис. 6. Схема вертикального перемещения точки судна: Z - вертикальное перемещение судна; Y - угол наклона судна от килевой качки; z - вертикальное перемещение точки A

Абсолютное вертикальное перемещение точек в шпангоутном сечении X , как следует из рисунка 6, равно

$$Z = xy - Z \text{ .}$$

Рассмотрим случай, когда контейнер с объектом находится в центре тяжести корабля, т. е. на него оказывает влияние только вертикальная качка. В соответствии с [5] упрощенное уравнение вертикальной качки можно записать:

$$\frac{D}{q} \frac{d}{dt} + g S_z = g e S r_0 \cos s t. \quad (7)$$

При решении этого уравнения получаем

$$z = \frac{r_0}{1-x^2}(\sin s t - x \sin n_z t); \quad (8)$$

здесь r_0 — полувисота действующих волн,
 S — частота волн,

$$X = \frac{S}{n_z},$$

$$n_z = \frac{Sg}{V_o}, \text{ где } S - \text{площадь ватерлинии, } V_o - \text{объем корабля по грузовую ватерлинию.}$$

Возьмем вторую производную от уравнения (8) и получим уравнение вертикального ускорения точки судна

$$\frac{\mathcal{A}}{2} = \frac{r_o}{1-x^2} (-s^2 \sin s t - x n_z^2 \sin n_z t). \quad (9)$$

Рассмотрим уравнение (9) для следующих условий:

$$r_0 = 2 \text{ м}, s = 0,5 \text{ Гц}, S = 2000 \text{ м}^2, \\ V_0 = 40000 \text{ м}^3.$$

Оно примет вид

$$Z_{\theta} = 4,08(0,35\sin 0,7t - 0,49\sin 0,7t) = -0,57\sin 0,7t. \quad (10)$$

Определим передаточные функции колебательных звеньев 1 и 2 на рис. 4, для чего в формуле (3) примем:

$$\begin{aligned} e_1 &= 0,7, \quad e_2 = 0,9, \quad T_1 = 0,05, \quad T_2 = 0,067, \\ h_1 &= 3 \cdot 10^{-6} \text{ М/Н}, \quad h_2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ М/Н}, \\ m_{\ddot{q}2} &= 6000 \text{ кг}, \quad m_2 + m_3 = 4000 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Подставив представленные выше величины и выражение (10) поочередно в формулы (5) и (4), получим уравнение вертикального перемещения точки С относительно точки А:

$$g_{\tilde{N}} = -1,68 \times 10^{-3} \sin 0,7t. \quad (11)$$

Взяв вторую производную, получаем уравнение ускорения перемещения точки С относительно точки А:

$$\ddot{g}_C = 0,82 \times 10^{-3} \sin 0,7t. \quad (12)$$

Аналогично получаем уравнение ускорения перемещения точки Е относительно точки С:

$$\ddot{g}_E = -3,18 \times 10^{-5} \sin 0,7t. \quad (13)$$

В формулах (10), (12), (13) максимальные величины будут при $\sin 0,7t = 1$:

$$\ddot{x}_{\max} = -5,7 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}^2;$$

$$\ddot{g}_{C \max} = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2;$$

$$\ddot{g}_{E \max} = -3,18 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2.$$

Из полученных значений видно, что для заданных в данном конкретном случае параметров звеньев их влияние не значительно и основной величиной, определяющей перегрузку в местах опирания объекта, будет ускорение, вызванное вертикальной качкой корабля.

Аналогично приведенному выше могут быть найдены параметры движения для других способов перемещения объектов морским транспортом и проведена их последующая оптимизация.

Кроме того, в дальнейшем можно определить связь между z и волновой ордина-

той r в комплексно-частотной области. Зависимость между изображениями z и r можно представить схемой, включающей два параллельно соединенных звена [6] (рис. 7).

Из представленной на рисунке 7 схемы следует, что связывающая $z(i\omega)$ и $r(i\omega)$ передаточная функция $W_z(i\omega)$ равна

$$W_z(i\omega) = xW_y(i\omega) - W_z(i\omega). \quad (14)$$

Здесь $W_y(i\omega)$ и $W_z(i\omega)$ – известные передаточные функции между y , z и волновой ординатой r . По компонентам записи $W_z(i\omega)$ в алгебраической форме определяется амплитудно-частотная характеристика $A_z(\omega)$:

$$A_z(\omega) = |W_z(i\omega)| = \sqrt{W_{z\text{Re}}^2 + W_{z\text{Im}}^2}. \quad (15)$$

Так как судно считается линейной системой, то $z(t)$ – это нормальный стационарный процесс. Его спектральная плотность

$$S_z(\omega_e) = A_z^2(\omega_e) S_r(\omega_e). \quad (16)$$

Дисперсия s_z^2 перемещений z равняется нулевому спектральному моменту

$$s_z^2 = \int_0^\infty S_z(\omega_e) d\omega_e. \quad (17)$$

Дисперсии скорости $\dot{z}$ и $\ddot{z}$ ускорения могут быть найдены по формулам

$$s_{\dot{z}}^2 = \int_0^\infty \omega_e^2 S_z(\omega_e) d\omega_e, \quad (18)$$

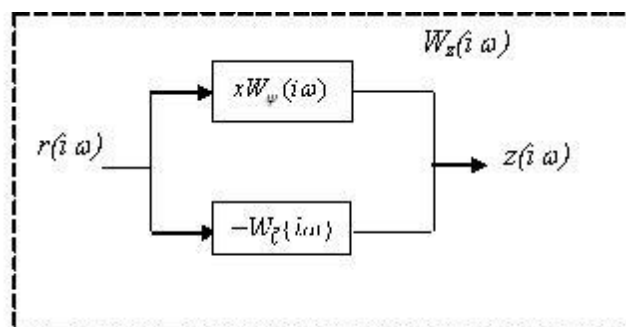


Рис. 7. Зависимость изображений z и r

$$s_{\text{ш}}^2 = \int_0^{\infty} w_e^4 S_z(w_e) dw_e. \quad (19)$$

Аналогично представленным выше можно получить выражения, описывающие колебания судна от бортовой качки.

Полученные выше математические выражения позволяют провести исследование зависимости величин перегрузок, возникающих в местах опирания блоков изделия, от интенсивности морского волнения, то есть от величин бортовой, килевой и вертикальной качки как от функций случайного процесса, и осуществить формирование методов оптимизации способов гашения возникающих воздействий на блоки РН.

Библиографический список

1. Райбман, Н. С. Построение моделей процесса производства./Н. С. Райбман,

В. М. Чадеев. - М.: Энергия, 1975. - 376 с.

2. Куропаткин, П. В. Теория автоматического управления./П. В. Куропаткин. - М.: Высш. школа, 1973. - 528 с.

3. Абакумов, А. М. Идентификация технологических процессов механической обработки на металлорежущих станках / Учебное пособие./А. М. Абакумов, В. П. Курган, В. Н. Михелькевич. – Самара: Самар. политехн. ин-т, 1991. - 118 с.

4. Ремез, Ю. В. Качка корабля./Ю. В. Ремез. - Л.: Судостроение, 1983. - 328 с.

5. Семёнов-Тян-Шанский, В. В. Качка корабля./В. В. Семёнов-Тян-Шанский, С. Н. Благовещенский, А. Н. Холодили. - Л.: Судостроение, 1969. - 400 с.

6. Вагущенко, Л. Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности./Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко, С. И. Заичко. – Одесса: Фенікс, 2005. - 274 с.

References

1. Raibman, N. S. Building models of production process /N. S. Raibman, V. M. Tchadeyev. – Moscow: Energiya, 1975 – 376 pp.

2. Kuropatkin, P. V. Theory of automatic control. / P. V. Kuropatkin – Moscow: Vysshaya shkola, 1973 – 528 pp.

3. Abakumov, A. M. Identification of mechanical treatment processes on metal-cutting machine-tools / Teaching aid / A. M. Abakumov, V. P. Kurgan, V. N. Mikhelkevitch. – Samara Polytechnical Institute, 1991. – 118 pp.

4. Remez, Yu. V. Ship rolling and pitching / Yu. V. Remez. – Leningrad: Sudostroyeniye, 1983 – 328 pp.

5. Semyonov-Tyan-Shansky, V. V. Ship rolling and pitching / V. V. Semyonov-Tyan-Shansky, S. N. Blagoveshchensky, A. N. Kholodilin. – Leningrad: Sudostroyeniye, 1969 – 400 pp.

6. Vagushchenko, L. L. Shipborne automatic systems of seaworthiness control / L. L. Vagushchenko, A. L. Vagushchenko, S. I. Zaitchko. – Odessa: Fenix, 2005 – 274 pp.

ANALYSIS OF LOADING CHARACTERISTICS OF “SOYUZ-ST” CARRIER ROCKET MODULES IN PLACES OF THEIR SUPPORT DURING SEA TRANSPORTATION

© 2009 S. V. Shirokov

Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”

The paper describes sea transportation of carrier rocket modules. A mathematical model is proposed which describes the dependence of loads in places of carrier rocket module support on vertical shifts of the vessel. The main characteristics of sea choppiness are given, regularities describing vertical shifts of a point of the vessel during sea choppiness are defined as a random process.

Carrier rockets, transportation, rigidity, sea choppiness, overloading, spectral density, dispersion.

Информация об авторе

Широков Сергей Витальевич, начальник отдела, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», e-mail: csdb@samtel.ru. Область научных интересов: автоматизированное управление технологическими процессами и производствами.

Shirokov Sergey Vitalyevitch, head of department, Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”, e-mail: csdb@samtel.ru. Area of research: automatic control of technological processes and productions.