

РАЗРАБОТКА ПОДВИЖНОЙ ЧАСТИ СТЕНДА С ЛИНЕЙНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНЕРЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ОБЪЕКТЕ

И.А. Лобастов
А.В. Палешкин

umli1996@gmail.com
paleshkin@mai.ru

МАИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложены основные параметры для новой схемы центробежного стенда с магнитным подвесом и линейным двигателем. Поскольку существующие стенды для моделирования линейных ускорений имеют ряд недостатков, предложено рассмотреть альтернативу классической схеме, в частности, отказаться от вращательного звена и заменить его кольцевой путевой структурой с линейным двигателем, по которой будет двигаться тележка с объектом испытания на магнитном подвесе. Проведен анализ различных систем стабилизации тележки в пространстве при движении с высокими скоростями. Учитывая спуск в атмосфере планет, конструктивные особенности изделий, испытывающих перегрузки, а также существующие центробежные стенды, сформированы основные исходные данные. Проведены расчеты магнитного подвеса на основе высокотемпературной сверхпроводящей иттриевой керамики и электротехнических параметров линейного двигателя, а также прочностной расчет подвижной части стенда в программном комплексе Femap with NX Nastran с учетом заданных эксплуатационных нагрузок. Предложен вариант реализации новой конструктивной схемы экспериментальной установки, обеспечивающий проведение испытаний на воздействие линейных ускорений в различных режимах эксплуатации

Ключевые слова

Спускаемые аппараты, экспериментальная отработка, центробежный стенд, линейный двигатель, магнитный подвес, высокотемпературные сверхпроводящие элементы, ракетно-космическая техника

Поступила 17.02.2020

Принята 02.03.2020

© Автор(ы), 2020

Введение. При теоретических исследованиях комплекса динамических процессов, сопровождающих как активный участок полета ракетно-космического носителя, так и спуск аппарата в различные атмосферы планет, возни-

кает множество проблем, требующих наземных исследований для корректировки математических моделей и методов расчета. При создании изделий ракетно-космической техники также необходимо учитывать не только характеристики отдельных систем, но и особенности их взаимодействия [1].

В связи с этим центробежные стенды являются основными для лабораторных исследований. Они позволяют воспроизводить как импульсные, так и длительно действующие перегрузки, но применительно к испытаниям спускаемых аппаратов у них имеется ряд недостатков. Кроме того, стенды должны обеспечивать условия нагружения, максимально приближенные к эксплуатационным, а также иметь высокий уровень защиты от аварийных ситуаций [2].

Анализ информации об имеющихся в настоящее время линейных двигателях и их технических характеристиках позволил поднять вопрос о пересмотре классической схемы центробежного стенда [3]. При сравнении обычного привода центробежного стенда с приводом на базе линейного двигателя выявлен ряд преимуществ: отсутствие потерь на трение, изнашиваемых элементов привода, элементов с температурными деформациями в приводе, элементов с упругими деформациями, передачи энергии на рабочий орган и промежуточных элементов для передачи к рабочему органу и др.

В настоящей работе рассмотрен вопрос о выборе проектных параметров подвижной части с обеспечивающими системами и облика центробежного стенда с линейным двигателем и магнитным подвесом.

Исходные данные и принятые допущения. Воздействие перегрузки на конструкцию и приборы спускаемого аппарата во время торможения в плотных слоях атмосферы является важным внешним фактором, оказывающим существенное влияние на возможность выполнения требуемых от спускаемого аппарата задач [4].

Ввиду этого все аппараты, которые в процессе функционирования подвергаются значительным перегрузкам, необходимо испытывать на воздействие линейных ускорений. Экспериментальными установками (ЭУ), способными моделировать такой вид воздействия, являются центрифуги [5, 6].

Основные недостатки существующих ЭУ — большой занимаемый объем; большой объем вакуумирования внутренней полости; наличие значительного числа трущихся элементов; неустойчивость при экстренной разбалансировке; высокие энергетические затраты.

Главной задачей при разработке стенда является минимизация приведенных недостатков. Например, применение кольцевой путевой структуры, т. е. реализация движения внутри торообразной трубы, позволит

отказаться от использования вращательного звена. В результате уменьшаются занимаемая площадь (пультная размещается внутри «кольца») и объем вакуумирования (снижается аэродинамическое сопротивление), а также отсутствует статическая балансировка [7].

На основании анализа существующих стендов сформированы следующие исходные данные [8]: максимальная перегрузка (n_{\max}) 100 ед.; средняя резкость перегрузки (c_n) 10 ед./с; радиус (R) ЭУ 10 м; допустимая масса объекта испытания до 1100 кг; общая масса подвижной части и объекта испытания до 2000 кг; габаритные размеры объекта испытания $1,3 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$; максимальная глубина вакуума до 10^2 Па.

Магнитные подвесы. В результате разработки различных бесконтактных систем, создания и испытания лабораторных моделей, опытных макетных изделий в области высокоскоростных транспортных средств установлено, что наиболее полно требованиям экономного расхода энергии, бесшумности и малого загрязнения окружающей среды отвечают технические средства на магнитном подвесе с линейным тяговым электроприводом, а также с автоматизированной системой стабилизации его положения в пространстве при движении со скоростями более 150 м/с [9].

Для исключения трения при работе ЭУ необходимо обеспечивать левитацию тележки с объектом испытания в двух направлениях: вертикальном и радиальном.

С решением первой задачи справляется подвес на постоянных магнитах с применением высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) керамики, кроме того, он позволяет удерживать тележку от радиальных смещений при очень низких скоростях (до 30 км/ч) [10, 11]. При испытаниях тележка с объектом испытания разгоняется до достаточно высоких скоростей. Поскольку движение происходит по круговой дистанции, то с ростом скорости увеличивается и сила инерции, которая при номинальном режиме работы в 100 раз больше силы тяжести. Поэтому для исключения латерального смещения необходим еще один подвес — сверхпроводниковый электродинамический подвес, который запитывается от бортового источника энергии постоянным током.

Вертикальный магнитный подвес с массивными ВТСП-элементами. В магнитных опорах наиболее перспективно применение монокристаллических однодоменных ВТСП-элементов на основе иттриевых керамик [12]. Электромагнитные и динамические характеристики магнитного подвеса существенно зависят от способа активации керамики. Существует два способа перевода ВТСП-элементов в сверхпроводящее состояние (рис. 1):

- в нулевом магнитном поле (*zero field cooling process* — *zfc*-процесс);
- в постоянном магнитном поле (*field cooling process* — *fc*-процесс).

Для практического применения наибольший интерес представляют подвесы, активация которых произошла в *fc*-процессе, поскольку такие системы имеют лучшие демпферные способности, несмотря на относительно более низкие значения сил левитации [13].

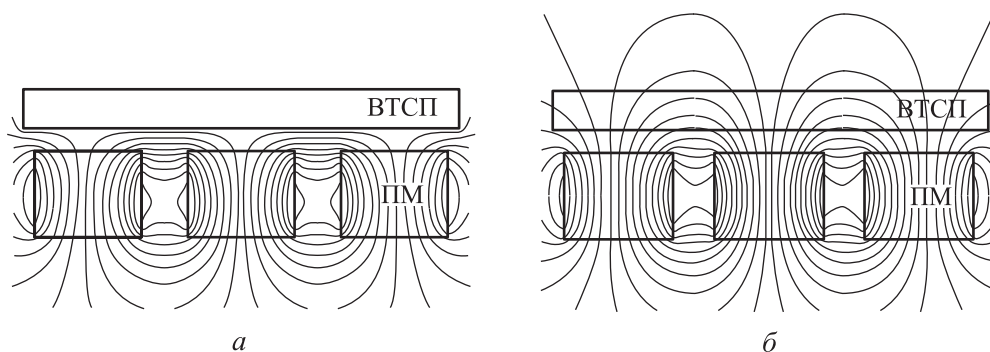


Рис. 1. Режимы активации магнитного ВТСП-подвеса:
a — *zfc*-процесс; *б* — *fc*-процесс

Согласно исходным данным для ЭУ был установлен зазор 5 мм. При таком зазоре подъемная сила лучших типовых образцов керамики массой 250 г составляет ~ 100 Н.

На основании этого несложно определить число ВТСП-элементов: округлим полученное число ВТСП-элементов до 200 шт., тогда масса всей керамики составит 50 кг.

Электродинамический радиальный подвес с ВТСП-лентой. В ЭУ такой вид подвеса необходим для предотвращения радиального смещения под действием силы инерции (центробежной силы) при движении тележки с объектом испытания по окружности.

Суть функционирования такой системы заключается в возникновении силы отталкивания между источником магнитного поля и проводником (проводящей пластиной) при движении [14].

Первостепенно необходимо по имеющимся данным определить нормальное ускорение и максимальную линейную скорость. Принимая ускорение свободного падения 10 м/с^2 , получаем, что нормальное ускорение и линейная скорость равны 1000 м/с^2 и 100 м/с .

На основании полученных и исходных данных определим максимальное значение центробежной силы — $2 \cdot 10^6 \text{ Н}$.

Тогда, по третьему закону Ньютона, сила отталкивания, создаваемая сверхпроводниковой катушкой, по модулю равна силе инерции. Сила магнитного взаимодействия в первом приближении также оценивается по формуле

$$F_{\text{магн}} = \frac{B^2}{2\mu_0} S_{\text{пол}}, \quad (1)$$

где B — индукция, создаваемая сверхпроводниковой катушкой; $S_{\text{пол}}$ — площадь полюса катушки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Из формулы (1) можно найти произведение квадрата магнитной индукции на площадь полюса:

$$B^2 S_{\text{пол}} = 2 |F_{\text{цб}}| \mu_0 = 5,027 \text{ Тл}^2 \cdot \text{м}^2. \quad (2)$$

В современных сверхпроводниковых катушках при зазоре до 10 мм индукция варьируется от 1,2 до 3 Тл. В перспективе при таком зазоре возможно использование катушек, индукция которых равна 4 Тл.

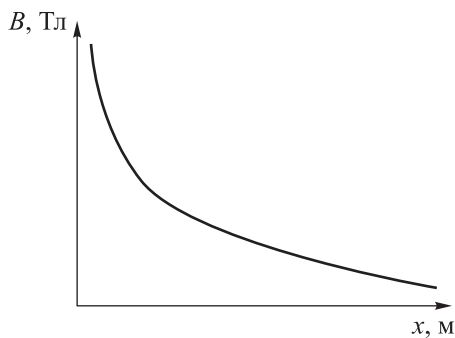


Рис. 2. Закон полного тока

Согласно закону полного тока (рис. 2) магнитная индукция определяется по следующей формуле:

$$B(x) = \frac{\mu_0 \cdot 2I_{\text{кр.сп}} \omega}{2\pi x}, \quad (3)$$

где $I_{\text{кр.сп}}$ — критический ток сверхпроводника; ω — число витков; x — воздушный зазор.

Выразим из формулы (3) магнитодвижущую силу (МДС):

$$I_{\text{кр.сп}} \omega = \frac{B \cdot 2\pi x}{2\mu_0}. \quad (4)$$

В таблицу сведены полученные по формуле (4) значения МДС при различных значениях зазора и магнитной индукции.

Значения МДС (А · виток) в зависимости от воздушного зазора и магнитной индукции

Воздушный зазор x , м	Магнитная индукция, Тл		
	1,2	2	3
0,01	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^4$
0,005	$1,5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^4$

Магнитная индукция пропорциональна МДС, т. е. силе тока и числу витков. Ввиду высокой стоимости ВТСП-ленты, трудностей обеспечения высоких значений силы тока на движущемся без трения объекте (т. е. можно использовать только бортовой источник питания), а также при учете площади полюса в качестве электродинамических подвесов выбрана катушка с индукцией 2 Тл.

Для обеспечения безопасности во время движения необходимо выбирать наибольший возможный зазор — 10 мм, в этом случае МДС составляет $5 \cdot 10^4$ А · виток.

Кроме того, обмотка катушки должна запитываться от источника постоянного тока для повышения критического тока в сверхпроводнике. В расчетах наибольшее значение силы тока, которое можно обеспечить с помощью бортового источника питания, равно 200 А. Определим необходимое число витков катушки из формулы (4)

$$\omega = \frac{I_{\text{кр.сп}}}{5 \cdot 10^4} = 250 \quad (5)$$

и площадь полюса катушки из (2)

$$S_{\text{пол}} = \frac{5,027}{B^2} = \frac{5,027}{2^2} \approx 1,25 \text{ м}^2. \quad (6)$$

Чтобы обеспечить наиболее равномерное распределение силы реакции отталкивания магнита по боковой поверхности тележки примем высоту электродинамического подвеса прямоугольной формы не менее $h_{\text{пол}} = 0,7$ м. Тогда на основании значения, полученного по формуле (6), периметр катушки $P_{\text{пол}} = 4,96$ м. В результате длину ВТСП-ленты на одну катушку рассчитаем по формуле

$$L_{\text{ВТСП}} = P_{\text{пол}}\omega = 1240 \text{ м}. \quad (7)$$

Линейный тяговый электродвигатель. Для любой бесконтактной системы на магнитном подвесе требуется бесконтактная передача тяговой силы. Она осуществляется за счет внедрения в установку линейного электродвигателя, который преобразует электрическую энергию в механическую для создания тяги и наоборот — при торможении в режиме рекуперации.

На основании существующих преимуществ и недостатков линейного электродвигателя в качестве системы, обеспечивающей бесконтактную передачу тяговой силы, в ЭУ был выбран линейный асинхронный двигатель [15–17].

Расчет линейного асинхронного двигателя. Для обеспечения требуемой резкости перегрузки время разгона тележки с объектом испытания должно составлять $t = 10$ с. Поэтому тяговая сила должна достигать значения 20 000 Н.

Для определения мощности линейного асинхронного двигателя воспользуемся основным расчетным уравнением электрических двигателей — формулой Арнольда:

$$P_{эл} = D_a^3 A_\delta B n \lambda \gamma \pi^2 \alpha = 1,14 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 1,14 \text{ МВт}, \quad (8)$$

где $D_a = 20$ м — диаметр ротора электродвигателя (в данном случае — средняя линия кольцевой путевой структуры); $A_\delta = 2000$ А/м — линейная токовая нагрузка (зависит от типа охлаждения статора, в данном случае — воздушное); $B = 0,45$ Тл — индукция в магнитном воздушном зазоре 5 мм;

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{V}{2\pi R} \approx 1,6 \text{ с}^{-1} \quad (9)$$

— частота вращения экипажа по круговой траектории ЭУ при номинальном режиме; $\lambda = 0,05$ — отношение ширины роторной пластины $L_s = 1$ м к диаметру ротора электродвигателя D_a ;

$$\gamma = \frac{L_a}{\pi D_a} = 0,029 \quad (10)$$

— коэффициент заполнения статора якорем или отношение длины ротора ($L_a = 1,8$ м) к длине статора; $\alpha = 0,7$ — коэффициент полюсного перекрытия.

Необходимо также учитывать коэффициент мощности линейного асинхронного двигателя $\cos \varphi = 0,88$, тогда реальная активная мощность

$$P_{акт} = P_{эл} \cos \varphi = 1\,003\,200 \text{ Вт} \approx 1 \text{ МВт}. \quad (11)$$

Принимая частоту тока $f = 50$ Гц, находим число пар полюсов:

$$p = \frac{f}{n} = 31,25 \approx 32. \quad (12)$$

Тогда можно определить длину межполюсного деления (рис. 3)

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} = 0,982 \text{ м}. \quad (13)$$

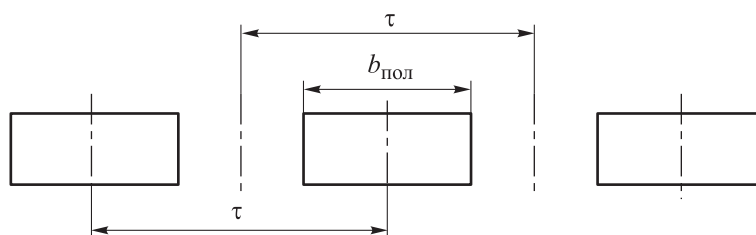


Рис. 3. Схема расположения полюсов электромагнитов

Зная коэффициент полюсного перекрытия ($\alpha = 0,7$), из формулы

$$\alpha = \frac{b_{\text{пол}}}{\tau} \quad (14)$$

определяем ширину полюса электромагнита

$$b_{\text{пол}} = \tau\alpha = 0,687 \text{ м.} \quad (15)$$

На основании полученных значений рассчитаем длину отверстия в медной пластине — роторе:

$$a_{\text{отв}} = \tau - b_{\text{пол}} = 0,295 \text{ м.} \quad (16)$$

На рис. 4 приведена принципиальная схема вторичного элемента. Толщина медного листа $h = 2 \text{ мм}$.

Условимся, что пластина с отверстием — это виток провода, имеющего два разных поперечных сечения (по длине и ширине). На рис. 4 штриховой линией обозначена условная ось проводника. Участки 1 и 3 имеют длину j и сечение S_2 , а участки 2 и 4 — i и S_1 :

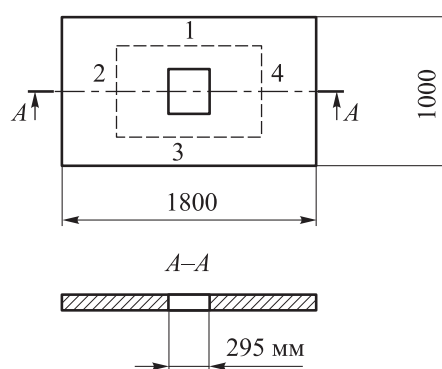


Рис. 4. Принципиальная схема роторной пластины

$$i = \frac{L_s + a_{\text{отв}}}{2} = 0,647 \text{ м}; \quad j = \frac{L_a + a_{\text{отв}}}{2} = 1,047 \text{ м}; \quad (17)$$

$$S_1 = \frac{L_a - a_{\text{отв}}}{2} h = 0,0015 \text{ м}^2; \quad S_2 = \frac{L_s - a_{\text{отв}}}{2} h = 7,055 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Отсюда запишем полные длины проводников одинакового сечения:

$$l_1 = i \cdot 2 = 1,295 \text{ м}; \quad l_2 = j \cdot 2 = 2,095 \text{ м}. \quad (18)$$

Суммарное сопротивление медной пластины вычислим как

$$R = \rho_{\text{Cu}} \left(\frac{l_1}{S_1} + \frac{l_2}{S_2} \right) = 6,509 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}. \quad (19)$$

Рассчитаем ЭДС индуцируемых токов по следующей формуле:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = \frac{[B - (-B)]}{T/2} S = 4Bnijk_{\Phi} = 2,167 \text{ В}, \quad (20)$$

где $k_{\Phi} = 1,11$ — эмпирический коэффициент.

Зная сопротивление медной пластины и индуцируемую ЭДС, определяем значение токов, возникающих в проводнике, по закону Ома:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = 3,329 \cdot 10^4 \text{ А}. \quad (21)$$

На основании полученных данных можно вычислить реальное значение тяговой силы по формуле

$$F_a = BI l_1 = 1,939 \cdot 10^4 \text{ Н}. \quad (22)$$

Результаты, полученные по формулам (8) и (22), в полной мере удовлетворяют требованиям к ЭУ.

Разработка конструкции тележки. Основной частью ЭУ является тележка (усиленная рама из алюминиевых профильных труб из сплава АМг6), на которую установлен объект испытания.

Рама изготовлена в соответствии с установленными габаритными размерами, максимально допустимой массой и требованиями к прочности, чтобы конструкция выдерживала перегрузку 100 ед. со средней резкостью последней 10 ед./с (режимы разгона и торможения).

На рис. 5 приведен итоговый вариант конструкции тележки.

Для оценки и оптимизации разработанной конструкции, согласно предъявленным условиям прочности, построена конечно-элементная модель тележки в программном комплексе Femap with NX Nastran.

Конечно-элементная модель (рис. 6) представлена одномерными балочными элементами типа beam, где для удобства конечные элементы показаны с визуализацией поперечного сечения, так как расчет проводился согласно балочной теории. Масса полезной нагрузки смоделирована точечными массовыми элементами типа MASS, заданными в центре

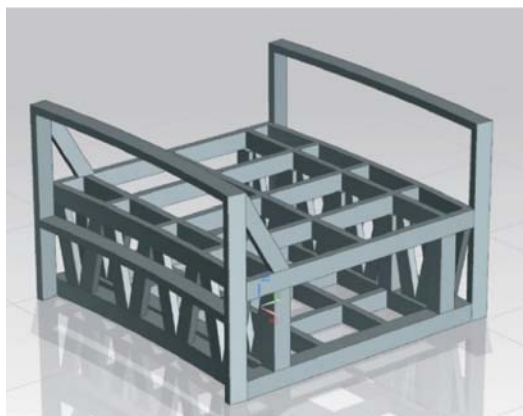


Рис. 5. Алюминиевая ферменная конструкция тележки

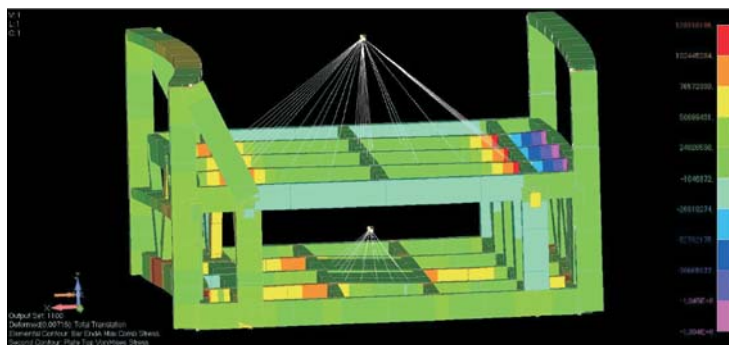


Рис. 6. Конечно-элементная модель тележки

масс, и распределенными в местах контакта (крепления) элементами жесткой связи RBE2. Массы электродинамических подвесов распределены набором элементов типа MASS по периметру их крепления в конструкции. Нагрузка задана в виде ускорений (g и a_n) для воспроизведения реальных инерционных сил в местах приложения массы, действующих на конструкцию. Силы, создаваемые ВТСП-опорой (магнитным подвесом), моделируются в расчетной модели за счет реакций, возникающих в местах закрепления модели (это справедливо, поскольку силы от подвеса должны уравнивать суммарную массу конструкции). Закрепление смоделировано в местах установки криостатов так, что конструкция не может перемещаться в вертикальном направлении вниз (т. е. запрещены вертикальные перемещения в одном направлении).

В результате нескольких итераций прочностного анализа и оптимизации конструкции за счет ее частичного изменения удалось добиться необходимого запаса прочности.

Нижней частью ЭУ является прямоугольный бетонный кольцевой желоб со средним радиусом 10 м (рис. 7).

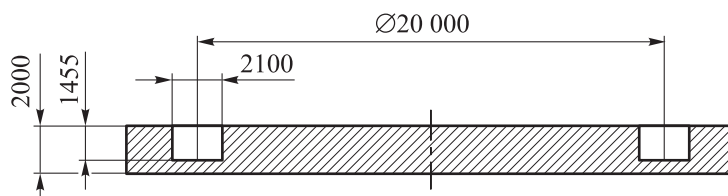


Рис. 7. Бетонный желоб в силовом полу

На дне желоба размещены статор линейного асинхронного двигателя и два ряда постоянных магнитов NdFeB. В той части, где установлена тележка, смонтированы гидравлические отводные удерживающие устройства, обеспечивающие сохранение воздушного зазора при неактивных ВТСП-опорах. При заливке бетона также необходимо предусмотреть входы и выходы для коммуникаций и вакуумной системы.

Верхняя часть представляет собой металлический каркас латерально рассеченной тороидальной формы, который обшит листами из прозрачного пластика, выдерживающего давление до 1 Па. Для загрузки в месте установки тележки смонтирована дверь на гидравлическом приводе.

На рис. 8 приведена концептуальная 3D-модель ЭУ с тележкой без обеспечивающих систем и объекта испытаний.

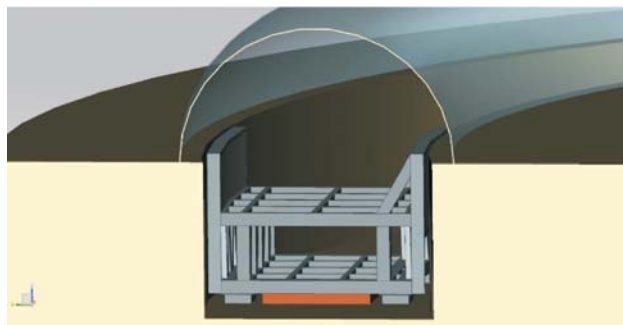


Рис. 8. Экспериментальная установка

Для снижения воздушного сопротивления необходимо вакуумировать внутренний объем ЭУ, составляющий 331,5 м³. Рабочее давление в ЭУ в процессе испытаний должно быть не более 10² Па.

Заключение. В результате проведенных расчетов разработана новая конструктивная схема ЭУ для проведения испытаний на воздействие линейных ускорений при различных режимах эксплуатации. Основное

внимание уделено разработке линейного двигателя в качестве привода центробежного стенда в виде подвижной части с обеспечивающими системами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Холодков Н.В., ред. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов. М., Изд-во МАИ, 1994.
- [2] Попов Е.И. Спускаемые аппараты. М., Знание, 1985.
- [3] Бочаров В.И., Нагорский В.Д. Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом. М., Транспорт, 1985.
- [4] Топорков А.Г. Расчет движения спускаемого аппарата в атмосфере Венеры. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [5] Захаров Ю.В. Моделирование динамических нагрузок космических аппаратов при спуске в атмосфере планеты. *Мат. Междунар. космич. конф.* М., Изд-во МАИ, 2001, с. 145–146.
- [6] Лобастов И.А., Алексеева Н.Н., Палешкина Ю.В. и др. Выбор проектных параметров центробежного стенда при квазистатико-колебательном нагружении испытуемого объекта. *Труды МАИ*, 2019, № 104.
URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=102240>
- [7] Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П. и др. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. М., Изд-во МАИ, 2014.
- [8] Маркачев Н.А., Захаров Ю.В., Гришин С.А. Опыт использования центробежных установок для наземной отработки автоматических космических аппаратов. *Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»*, 2012, № 2, с. 44–51.
- [9] Бочаров В.И., Нагорский В.Д., ред. Транспорт с магнитным подвесом. М., Машиностроение, 1991.
- [10] Werfel F.N., Floegel-Delor U., Rothfeld R., et al. Bulk superconductors in mobile application. *Phys. Procedia*, 2012, vol. 26, no. 3, pp. 948–952.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.235>
- [11] Werfel F.N., Floegel-Delor U., Rothfeld R. Experiments of superconducting Maglev ground transportation. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, no. 3, art. 3602105.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2524471>
- [12] Schmidt V.V. The physics of superconductors. Springer, 1997.
- [13] Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев М.А., ред. Электромеханические преобразователи на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. М., МАИ-Принт, 2008.
- [14] Yonezu T., Watanabe K., Suzuki E., et al. Study on electromagnetic force characteristics acting on levitation/guidance coils of a superconducting maglev vehicle system. *IEEE Trans. Magn.*, 2017, vol. 53, no. 11, art. 8300605.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2697002>

- [15] Gieras J.F., Piech Z.J., Tomczuk B. Linear synchronous motor. New York, CRC Press, 2000.
- [16] Deng Z., Zhang W., Zheng J., et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, vol. 27, no. 6, art. 3602008. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2716842>
- [17] Deng Z., Zhang W., Zheng J., et al. A high-temperature superconducting Maglev ring test line developed in Chengdu, China. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, no. 6, art. 3602408. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2555921>

Лобастов Игорь Алексеевич — студент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

Палешкин Андрей Вячеславович — доцент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лобастов И.А., Палешкин А.В. Разработка подвижной части стенда с линейным двигателем и магнитным подвесом для моделирования инерционных нагрузок на объекте. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 5, с. 4–18. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-4-18>

**DEVELOPING A MOVABLE PART FOR A TEST BENCH FEATURING
A LINEAR MOTOR AND MAGNETIC SUSPENSION FOR SIMULATING
INERTIAL LOADS ON AN OBJECT**

I.A. Lobastov
A.V. Paleshkin

umli1996@gmail.com
paleshkin@mai.ru

**Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation**

Abstract

We selected the main parameters for a new layout of a centrifugal installation featuring a linear motor and magnetic suspension. Since existing test benches for simulating linear accelerations have a range of disadvantages, we propose to consider an alternative to the classical layout, in particular, to reject the rotary link and replace it by a ring-like path structure with a linear motor, along which a trolley carrying the object under investigation will move on a magnetic suspension. We analysed various spatial stabilisation systems

Keywords

Space capsules, development testing, centrifugal test bench, linear motor, magnetic suspension, high-temperature superconducting elements, aerospace engineering

for the trolley moving at high velocities. We defined the key initial data, taking into account descent into planetary atmospheres, design specifics of products subjected to G-forces and existing centrifugal installations. We computed the parameters of a magnetic suspension based on high-temperature superconducting yttrium ceramics and electrical engineering parameters of the linear motor, and carried out strength calculations for the movable part of the test bench using the Femap with NX Nastran software package, accounting for the operational loads intended. The paper presents an option for implementing a new structural layout of an experimental installation that ensures linear acceleration testing in various operation modes

Received 17.02.2020

Accepted 02.03.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Kholodkov N.V., ed. Eksperimental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov [Experimental optimization of spacecraft]. Moscow, MAI Publ., 1994.
- [2] Popov E.I. Spuskaemye apparaty [Descent vehicles]. Moscow, Znanie Publ., 1985.
- [3] Bocharov V.I., Nagorskiy V.D. Vysokoskorostnoy nazemnyy transport s lineynym privodom i magnitnym podvesom [High-speed ground transportation with linear motor and magnetic suspension]. Moscow, Transport Publ., 1985.
- [4] Toporkov A.G. Raschet dvizheniya spuskaemogo apparata v atmosfere Venery [Calculation of descent vehicle motion in Venus atmosphere]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012.
- [5] Zakharov Yu.V. [Modeling spacecraft dynamic loads during descent in planet atmosphere]. *Mat. Mezhdunar. kosmich. konf.* [Proc. Int. Space Conf.]. Moscow, MAI Publ., 2001, pp. 145–146 (in Russ.).
- [6] Lobastov I.A., Alekseeva N.N., Paleshkina Yu.V., et al. Selecting design parameters of the centrifugal test bench while quasi-static-oscillating loading of the test object with free oscillations of the system. *Trudy MAI*, 2019, no. 104 (in Russ.). Available at: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=102240>
- [7] Galeev A.G., Zakharov Yu.V., Makarov V.P., et al. Proektirovanie ispytatel'nykh stendov dlya eksperimental'noy otrabotki ob"ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki [Designing test stands for experimental optimization of rocket and space technique]. Moscow, MAI Publ., 2014.
- [8] Markachev N.A., Zakharov Yu.V., Grishin S.A. Use of centrifugal units for automated spacecraft ground testing. *Vestnik FGUP "NPO im. S.A. Lavochkina"*, 2012, no. 2, pp. 44–51 (in Russ.).
- [9] Bocharov V.I., Nagorskiy V.D., eds. Transport s magnitnym podvesom [Transport with magnetic suspension]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991.

- [10] Werfel F.N., Floegel-Delor U., Rothfeld R., et al. Bulk superconductors in mobile application. *Phys. Procedia*, 2012, vol. 26, no. 3, pp. 948–952.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.235>
- [11] Werfel F.N., Floegel-Delor U., Rothfeld R. Experiments of superconducting Maglev ground transportation. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, no. 3, art. 3602105.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2524471>
- [12] Schmidt V.V. The physics of superconductors. Springer, 1997.
- [13] Kovalev L.K., Kovalev K.L., Koneev M.A., eds. Elektromekhanicheskie preobrazovately na osnove massivnykh vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov [Electromechanical converters based on massive high-temperature superconductors]. Moscow, MAI-Print Publ., 2008.
- [14] Yonezu T., Watanabe K., Suzuki E., et al. Study on electromagnetic force characteristics acting on levitation/guidance coils of a superconducting maglev vehicle system. *IEEE Trans. Magn.*, 2017, vol. 53, no. 11, art. 8300605.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2697002>
- [15] Gieras J.F., Piech Z.J., Tomczuk B. Linear synchronous motor. New York, CRC Press, 2000.
- [16] Deng Z., Zhang W., Zheng J., et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, vol. 27, no. 6, art. 3602008. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2716842>
- [17] Deng Z., Zhang W., Zheng J., et al. A high-temperature superconducting Maglev ring test line developed in Chengdu, China. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, no. 6, art. 3602408. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2555921>

Lobastov I.A. — Student, Department of Operation Management of Aerospace Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Paleshkin A.V. — Assoc. Professor, Department of Operation Management of Aerospace Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Lobastov I.A., Paleshkin A.V. Developing a movable part for a test bench featuring a linear motor and magnetic suspension for simulating inertial loads on an object. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 5, pp. 4–18 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-4-18>