

Богданов Д.Ю., Кравченко О.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТЕНДОВ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ С УЧЕТОМ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РАДИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Для подготовки космонавтов к внекорабельной деятельности применяют стенды обезвешивания, реализуемые с использованием многокоординатных силокомпенсирующих систем (СКС), обеспечивающих до шести степеней подвижности объекта. Реализация составляющих движения на них обеспечивается суммой трех взаимно перпендикулярных движений, а также вращением и качанием объекта относительно его центра масс в кардановом подвесе. Для выполнения комплексных исследований, структурно-параметрического синтеза системы управления, анализа статических, динамических показателей работы СКС разработана математическая модель, описывающая силовые взаимодействия в многокоординатных СКС радиальной конструкции.

Сформулированы допущения, принимаемые при получении математического описания механической части СКС. Выделены четыре основных элемента, взаимодействующих друг с другом: мост, тележка, барабан и обезвешиваемый объект. С использованием метода поэлементного описания получены уравнения, описывающие взаимосвязанное движение координат СКС при приложении к обезвешиваемому объекту внешнего силового воздействия. С учетом принципов управления электродвигателями и анализа физических процессов в механической части СКС обоснована целесообразность представления математического описания каждой из координат СКС в виде обобщенной двухмассовой электромеханической моделью с упругой связью.

Приведены аналитические выражения для определения параметров обобщенной математической модели и рассмотрены взаимовлияния координат при изменении параметров и силовых воздействиях. Приведены экспериментальные исследования силовых взаимодействий на примере устройства обезвешивания полезного груза при изменении параметров объекта управления.

**Ключевые слова:** стенды обезвешивания, тренажеры, имитация невесомости, регулирование усилий, математическая модель.

### ВВЕДЕНИЕ

За 2013-2017 годы на Международной космической станции было осуществлено 34 выхода в открытый космос с максимальной продолжительностью в 8 ч 7 мин. При выходах решались задачи обслуживания космической станции и установки нового оборудования. Такие операции в условиях открытого космоса особенно сложны и требуют от космонавтов слаженной профессиональной работы. Поэтому при подготовке космонавтов к работе в открытом космосе необходимо получить специальные навыки в работе, которые в НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина отрабатываются на специальных тренажерах, обеспечивающих имитацию условий невесомости. При этом возрастающее число типов операций, их сложности и количества постоянно повышает требования, предъявляемые к подготовке космонавтов, а следовательно, и к тренажерам. Прогнозируемые в ближайшем будущем Лунные и Марсианские программы выводят требования к тренажерам на качественно новый уровень [1]. Поэтому разработка и создание перспективных тренажеров и модернизация существующих тренажеров для обеспечения подготовки в условиях пониженной гравитации является актуальной задачей.

С 2002 года в НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина эксплуатируется тренажерный комплекс «Выход-2», предназначенный для отработки циклограмм шлюзования и элементов внекорабельной деятельности. Данный тренажер обеспечивает имитацию условий невесомости по средствам электромеханической силокомпенсирующей системы. В такой силокомпенсирующей системе с помощью синхронного электродвигателя компенсируется вес перемещаемого объекта, а также возникающие в процессе силы трения и силы инерции дополнительных присоединенных масс, что позволяет

осуществлять космонавту в скафандре перемещения посредством малых собственных усилий (около 50Н), аналогично движению в невесомости. С 2013 года на данном тренажере проводятся научно-исследовательские работы с участием экипажей МКС по изучению особенности перемещения космонавта после длительного перелета на Марс [2], которые показали перспективность тренажеров данного типа.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫБОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Конструкция тренажера «Выход-2» выполнена в виде мостового радиального крана (рис. 1). Такая конструкция позволяет размещать приводные устройства вне подвижных частей тренажера и упрощает подвод коммуникаций к скафандру. Недостатком тренажера «Выход-2» является пассивная система горизонтальных перемещений, которая позволяет реализовывать с требуемым качеством лишь медленные перемещения (до 0,2 м/с). Исследования [3-6] показали, что для реализации перспективных тренажеров, позволяющих имитировать условия невесомости и пониженной гравитации, необходимо использовать активные системы вертикальных и горизонтальных поступательных перемещений.

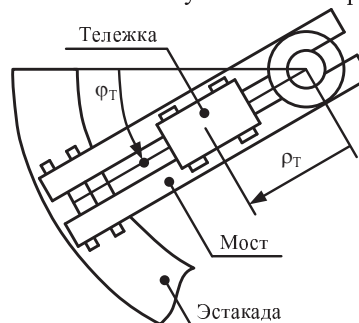


Рис. 1. Схема радиальной конструкции тренажера «Выход-2» (вид сверху)

При создании реализованных таким образом многокоординатных СКС необходимо решить задачу получения обобщенной математической модели, позволяющей выполнять комплексные исследования, анализ статических, динамических показателей работы стенов обезвешивания, структурно-параметрического синтеза системы управления, исследования силовых взаимодействий между координатами СКС [7-10]. Наиболее общий подход к получению математического описания ЭМС с УС связи основан на уравнениях Лагранжа. Комплексное системное применение этого подхода позволяет получить формальный метод строгого математического описания процессов в форме уравнений Лагранжа-Максвелла. Основная сложность в использовании уравнений Лагранжа-Максвелла для математического описания многокоординатных СКС связана со сложностью применения на начальном этапе допущений и отсутствием рекомендаций по выбору обобщенных координат. Также большое распространение при исследовании ЭМС получил метод поэлементного их описания, в основу которого положена идея получения исходных уравнений системы с непосредственным применением законов механики, электротехники и других смежных дисциплин [11].

Этот подход базируется на изучении физики процессов и явлений, происходящих в отдельных устройствах и элементах систем, и учёте их влияния друг на друга с помощью уравнений связи. Такой подход на этапе составления исходных уравнений позволяет выделить только основные силы и моменты, действующие в СКС, а также делать допущения в ходе преобразований исходных уравнений и анализировать полученные конечные уравнения с физической точки зрения. Поэтому при математическом описании стенов обезвешивания целесообразно использовать метод поэлементного описания механической части стенов обезвешивания. Математическое описание механической и электромеханической частей СКС с учётом специфики управления

электродвигателями целесообразно выполнять с использованием модели двухфазной обобщенной электрической машины и метода обобщенного пространственного вектора [12].

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Для математического описания системы радиальной конструкции удобно использовать цилиндрическую систему координат, ось которой совпадает с осью вращения моста. Тогда точка схода каната с тележки будет описываться координатами  $(\rho_T, \varphi_T, z_T)$ , где  $\rho_T$  – расстояние от оси вращения до центра тележки,  $\varphi_T$  – угол поворота моста,  $z_T$  – расстояние от пола до точки схода каната. По аналогии центр масс обезвешиваемого объекта будет иметь координаты  $(\rho_0, \varphi_0, z_0)$ . Для получения математической модели механической части стенов обезвешивания составлены его расчётные схемы, приведённые на **рис. 2**.

Для получения математического описания целесообразно применять следующие допущения: элементы конструкции моста и тележки под действием внешних сил не деформируются, мост имеет одну степень подвижности, тележка имеет возможность перемещаться только вдоль моста; направляющие, по которым обеспечивается перемещение моста и тележки, расположены в горизонтальной плоскости, волновым характером распространения деформации каната можно пренебречь, канат невесом и в процессе работы всегда натянут, деформация каната подчиняется закону Гука; барабан жестко связан с мостом, при намотке каната радиус барабана и точка схода каната остаются постоянными, что обеспечивается конструктивно; силы и моменты приложены к недеформируемому сосредоточенным неизменяемым массам; центр масс объекта обезвешивания всегда находится на прямой, являющейся продолжением каната; объект обезвешивания может свободно вращаться относительно точки крепления его к канату, поэтому моментом закручивания каната можно пренебречь.

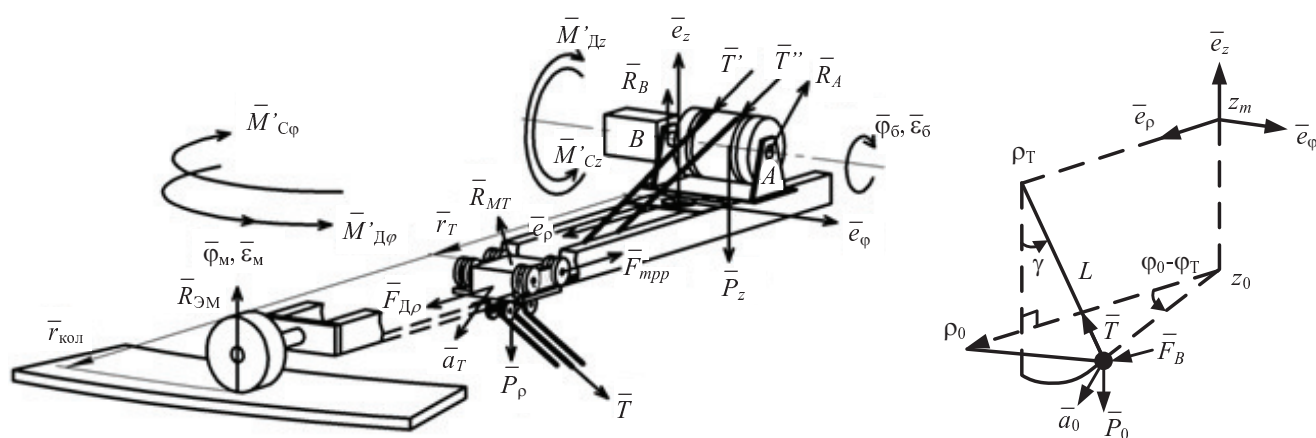


Рис. 2. Расчётные схемы для механической части стенов обезвешивания

Выделив в рассматриваемой механической системе четыре основных элемента, взаимодействующих друг с другом (мост, тележку, барабан и обезвешиваемый объект), с учётом действующих на них усилий и моментов, указанных на рис. 2, можно составить для каждого из них уравнение движения в векторной форме записи:

для моста

$$J_{\varphi} \bar{\varepsilon}_m = \bar{M}'_{дф} + \bar{M}'_{сф} + [\bar{r}_{кол} \times \bar{R}_{ЭМ}] + [\bar{r}_T \times \bar{R}_{ТМ}] + [\bar{r}_{сф} \times \bar{P}_{\varphi}] - [\bar{r}_{Аф} \times \bar{R}_A] - [\bar{r}_{Вф} \times \bar{R}_B], \quad (1)$$

для тележки

$$m_p \bar{a}_T = \bar{F}_{Др} + (-\bar{T}) + \bar{F}_{Cp} + \bar{R}_{MT} + \bar{P}_p, \quad (2)$$

для барабана

$$J_z \bar{\varepsilon}_B = \bar{M}'_{Дз} + \bar{M}'_{Сз} + [\bar{r}_{к1} \times \bar{T}'] + [\bar{r}_{к2} \times \bar{T}'] + [\bar{r}_{Bz} \times \bar{R}_B] + [\bar{r}_{Cz} \times \bar{P}_z], \quad (3)$$

для обезвешиваемого объекта

$$m_o \bar{a}_o = \bar{T} + \bar{F}_B + \bar{P}_o + \bar{F}_{Co}, \quad (4)$$

где  $m_p$ ,  $m_o$  – суммарные массы тележки и обезвешиваемого объекта с установленными на них механизмами;  $J_{\varphi}$ ,  $J_z$  – моменты инерции моста и барабана;  $\bar{a}_T$ ,  $\bar{a}_o$  – ускорения тележки и обезвешиваемого объекта;  $\bar{\varepsilon}_m$ ,  $\bar{\varepsilon}_B$  – угловые ускорения моста и барабана;  $\bar{P}_{\varphi}$ ,  $\bar{P}_p$ ,  $\bar{P}_z$ ,  $\bar{P}_o$  – суммарный вес моста, тележки, барабана и обезвешиваемого объекта с установленными на них механизмами;  $\bar{F}_{Др}$  – суммарная сила тяги электропривода тележки;  $\bar{F}_{Cp}$ ,  $\bar{F}_{Co}$  – силы сопротивления движению тележки и обезвешиваемого объекта, обусловленные трением;  $\bar{M}'_{дф}$  – момент двигателя моста, приведенный к оси поворота моста;  $\bar{M}'_{сф}$  – момент сопротивления повороту моста, обусловленный трением;  $\bar{M}'_{Дз}$ ,  $\bar{M}'_{Сз}$  – моменты двигателя системы вертикальных перемещений (СВП) и сил сопротивления, обусловленных трением, приведённые к валу барабана диаметром  $D_B$ ;  $\bar{R}_{ЭМ}$ ,  $\bar{R}_{MT}$  ( $\bar{R}_{ТМ}$ ) – силы реакции на мост со стороны эстакады и на тележку со стороны моста (на мост со стороны тележки);  $\bar{R}_A$ ,  $\bar{R}_B$  – силы реакции подшипников на вал барабана;  $\bar{F}_B$  – внешняя сила, прикладываемая к обезвешиваемому объекту;  $\bar{T} = T_{\varphi} \bar{e}_{\varphi} + T_{\rho} \bar{e}_{\rho} + T_z \bar{e}_z$  – совокупная сила натяжения ветвей канатной передачи, приложенная к обезвешиваемому объекту;  $\bar{T}' = \bar{T}'' = \bar{T}/4$  – сила натяжения одной ветви каната;  $T_{\rho} = T(\rho_T - \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T))/L$ ,  $T_{\varphi} = T \rho_o \sin(\varphi_T - \varphi_o)/L$ ,  $T_z = T(z_T - z_o)/L$  – проекции совокупной силы натяжения каната на оси ортогональной системы координат, привязанной к мосту соответственно;  $\bar{e}_{\varphi}$ ,  $\bar{e}_{\rho}$ ,  $\bar{e}_z$  – ортогональный базис;  $L = \sqrt{\rho_T^2 + \rho_o^2 - 2\rho_T \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)} + (z_T - z_o)^2$  – расстояние от точки схода каната до центра масс обезвешиваемого объекта;  $\bar{r}_{к1}$ ,  $\bar{r}_{к2}$ ,  $\bar{r}_{Bz}$ ,  $\bar{r}_{Cz}$  – радиусы-векторы точек приложения соответствующих сил  $\bar{T}'$ ,  $\bar{T}''$ ,  $\bar{R}_B$ ,  $\bar{P}_z$ , направленные из точки A на оси вращения барабана;  $\bar{r}_{кол}$ ,  $\bar{r}_T$ ,  $\bar{r}_{сф}$ ,  $\bar{r}_{Аф}$ ,  $\bar{r}_{Вф}$  – радиусы-векторы точек приложения соответствующих сил  $\bar{R}_{ЭМ}$ ,  $\bar{R}_{ТМ}$ ,  $\bar{P}_{\varphi}$ ,  $\bar{R}_A$ ,  $\bar{R}_B$ , направленные из оси поворота моста.

Записав полученные уравнения моста (1) в проекции на базисный вектор  $\bar{e}_{\varphi}$ , тележки (2) – на базисный вектор  $\bar{e}_{\rho}$ , барабана (3) – на его ось, обезвешиваемого объекта (4) в проекциях на канат и вектора  $\bar{e}_{\varphi}$ ,  $\bar{e}_{\rho}$ , получим математическое описание механической части стенов обезвешивания в скалярном виде

$$J_{\varphi} \frac{d^2 \varphi_m}{dt^2} = M'_{дф} - M'_{сф} - \rho_T T \frac{\rho_o \sin(\varphi_T - \varphi_o)}{L} + \rho_T m_T \left( 2 \frac{d\rho_T}{dt} \frac{d\varphi_T}{dt} - \rho_T \frac{d^2 \varphi_T}{dt^2} \right); \quad (5)$$

$$m_p \left( \frac{d^2 \rho_T}{dt^2} + \rho_T \left( \frac{d\varphi_T}{dt} \right)^2 \right) = F_{Др} - F_{Cp} - T \frac{\rho_T - \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)}{L}; \quad (6)$$

$$J_z \varepsilon_B = M'_{Дз} - M'_{Сз} - T \frac{D_B}{4}; \quad (7)$$

$$m_o \left( \rho_o \frac{d^2 \varphi_o}{dt^2} - 2 \frac{d\rho_o}{dt} \frac{d\varphi_o}{dt} \right) = F_{B\varphi} - F_{соф} + T \frac{\rho_o \sin(\varphi_m - \varphi_o)}{L}; \quad (8)$$

$$m_o \left( \frac{d^2 \rho_o}{dt^2} + \rho_o \left( \frac{d\varphi_o}{dt} \right)^2 \right) = F_{B\rho} - F_{со\rho} + T \frac{\rho_T - \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)}{L}; \quad (10)$$

$$m_o \left( L \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)^2 + \frac{d^2 L}{dt^2} \right) = F_{Bz} - F_{соz} + T - P_o \cos(\gamma), \quad (11)$$

где  $\gamma = \arcsin \left( \sqrt{\rho_T^2 + \rho_o^2 - 2\rho_T \rho_o \cos(\varphi_o - \varphi_T)} / L \right)$  – угол отклонения каната от вертикали.

Качество работы силокомпенсирующих систем обезвешивания принято характеризовать отношением некомпенсированных сил к весу объекта, в частности для тренажера «Выход-2» это отношение должно быть менее 2%. Выполненные исследования показали, что для обеспечения этого требования угол отклонения каната от вертикали  $\gamma$  не должен превышать  $1,1^\circ$ , что позволяет линеаризовать тригонометрические функции в математическом описании. Приведя переменные в полученных уравнениях к валам электроприводов со-ответствующих координат с учётом моментов инерции электродвигателей и механических передач, выполнив преобразование Лапласа, получим уравнения движения, описывающие взаимосвязанное движение исследуемых координат при приложении к обезвешиваемому объекту внешнего силового воздействия. Анализ математического описания показал, что уравнения движения для каждого базисного направления ( $\varphi$ ,  $\rho$ ,  $z$ ) можно свести к виду двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС):

$$\begin{cases} J_1 \Omega_1 s = M_D - (b + C/s)(\Omega_1 - \Omega_2) - M_1; \\ J_2 \Omega_2 s = M_B + (b + C/s)(\Omega_1 - \Omega_2) - M_2, \end{cases} \quad (11)$$

где для каждого базисного направления:  $J_1, J_2$  – моменты инерции ротора двигателя с жестко связанными с ним механизмами и обезвешиваемого объекта;  $C, b$  – коэффициенты, учитывающие жёсткость и диссипативные силы упругой механической передачи;  $\Omega_1, \Omega_2$  – скорости двигателя и объекта обезвешивания;  $M_d, M_B$  – моменты двигателя и внешнего воздействия;  $M_1, M_2$  – возмущающие воздействия, действующие на двигатель и обезвешиваемый объект;  $s$  – оператор Лапласа

Таким образом, математическое описание по трем координатам СКС можно представить в виде ДЭМС (11). А силовые взаимодействия между координатами СКС, как и действия на них гравитационных сил и сил трения, учесть в возмущающих воздействиях  $M_1$  и  $M_2$ , зависимости которых приведены в табл. 1.

Здесь  $M_{тр}$  – момент трения в механической передаче тележки, моста и барабана;  $\rho_{пр\rho}, \rho_{прz}$  – радиусы приведения сил к двигателям тележки и барабана соответственно;  $i_\phi = \Omega_{1\phi}/\Omega_m$  – передаточное отношение механической передачи моста;  $\Omega_{1\rho}, \Omega_{1\phi}$  – скорость вращения двигателя тележки и моста;  $\Omega_{2\rho}, \Omega_{2\phi}$  – скорости движения обезвешиваемого объекта, приведенные соответственно к двигателю тележки и моста;  $\Omega_m$  – скорость поворота моста;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\dot{\gamma}$  – производная по времени от угла отклонения каната от вертикали.

При работе координат СКС параметры математической модели ДЭМС изменяются в зависимости от положения и массы объекта обезвешивания. Функции, описывающие такие изменения, сведены в табл. 2.

Таблица 1

Выражения для возмущающих воздействий  $M_1, M_2$  каждого направления движения

$M_1, M_2$	Зависимость
$M_{1\phi}$	$M_{тр\rho} + m_\rho \rho_{тр\rho} \Omega_{1\phi}^2 / i_\phi^2$
$M_{2\phi}$	$m_o \rho_{пр\rho} \Omega_{2\phi}^2 / i_\phi^2$
$M_{1\rho}$	$M_{тр\phi} - 2m_\rho \rho_{тр\phi} \Omega_{1\phi} \Omega_{1\rho} / i_\phi^2$
$M_{2\rho}$	$-2m_o \rho_{пр\phi} \Omega_{2\phi} \Omega_{2\rho} / i_\phi^2$
$M_{1z}$	$M_{трz}$
$M_{2z}$	$m_o g \rho_{прz} \cos(\gamma) - m_o \dot{\gamma}^2 \rho_{прz}$

Таблица 2

Функции изменения параметров математической модели

$j$	$J_{1j}$	$J_{2j}$	$C_j$
$\phi$	$m_\rho \rho_{пр\rho}^2 + J_{д\rho}$	$m_o \rho_{пр\rho}^2$	$m_o g \rho_{пр\rho}^2 \frac{1}{L}$
$\rho$	$m_\rho \frac{\rho_{тр}^2}{i_\phi^2} + J_{д\phi}$	$m_o \frac{\rho_{тр}^2}{i_\phi^2}$	$m_o g \frac{\rho_{тр}^2}{i_\phi^2} \frac{1}{L}$
$z$	$J_{дz}$	$m_o \rho_{прz}^2$	$C_o \frac{l_{const} + L_{max}}{l_{const} + L}$

Здесь  $J_{д\rho}, J_{д\phi}, J_{дz}$  – суммарные моменты инерции двигателей тележки, моста, барабана с жестко связанными с ними механизмами совершающими вращательное движение;  $C_o$  – эквивалентная жёсткость канатной передачи, соответствующая длине  $l_{const} + L_{max}$ ;  $l_{const}$  – длина горизонтального неизменяемого участка каната;  $L_{max}$  – максимальная длина вертикального участка каната  $L$ .

Математическое описание электромеханических преобразователей выполнено с учётом того, что в СКС целесообразно применять синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) при работе до номинальной скорости. При использовании векторного управления СДПМ с ориентацией по вектору потокоцепления, создаваемого постоянными магнитами ротора, и использовании блоков компенсации перекрестных связей [13, 14] математическая модель электромеханических преобразователей может быть представлена передаточными функциями, приведенными на рис. 3. С учётом математического описания силового преобразователя двигателя и отрицательной обратной связи по току, математическую модель многокоординатной СКС можно унифицировать, получив обобщённое математическое описание по вертикальной и горизонтальным координатам СКС. Тогда с учетом выражений, приведенных в табл. 1, 2, структурная схема обобщенной математической модели СКС по одной из координат будет иметь вид, представленный на рис. 3.

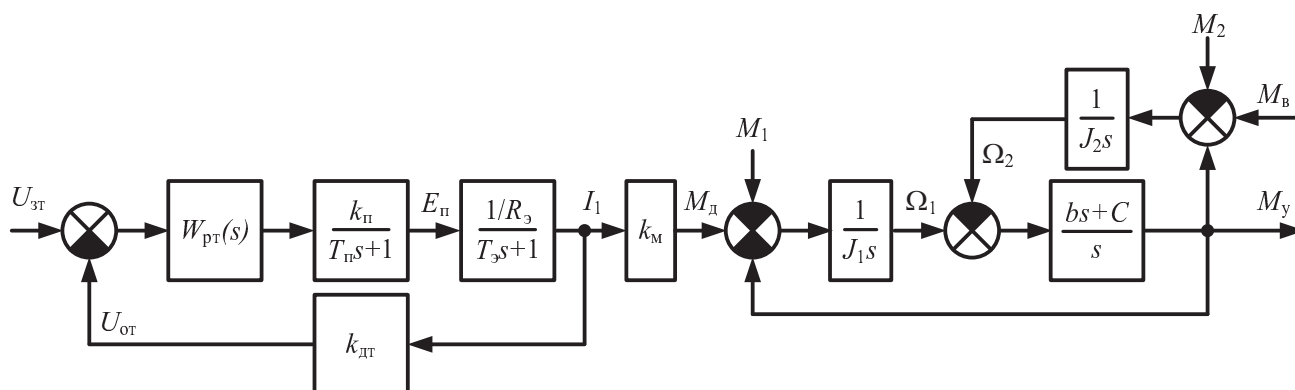


Рис. 3. Обобщенная математическая модель СКС

На рис. 3 приведены следующие обозначения:  $T_n$  – постоянная времени, учитывающая инерционные свойства преобразователя;  $k_n$  – коэффициент передачи преобразователя по напряжению;  $E_n$  – ЭДС преобразователя;  $W_{pt}(s)$  – передаточная функция регулятора электромагнитного момента (тока) электродвигателя;  $k_{dt}$  – коэффициент передачи обратной связи по электромагнитному моменту (току) электродвигателя;  $T_s$  – электромагнитная постоянная времени статора СДПМ;  $R_s$  – эквивалентное сопротивление СДПМ;  $k_m$  – коэффициент передачи СДПМ;  $U_{от}$  – сигнал обратной связи по току (электромагнитному моменту) электродвигателя;  $U_{zt}$  – сигнал задания на ток (электромагнитный момент) электродвигателя.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования взаимодействий между координатами осуществлялись на СКС устройства обезвешивания полезного груза (УОГ), предназначенного для работы космонавтов во время тренировок со вспомогательным оборудованием (рис. 4). УОГ предназначено для обезвешивания объектов массой от 10 до 100 кг в рабочем пространстве радиусом в 7,2 м и высотой 8 м. УОГ обеспечивает перемещение обезвешиваемого объекта со скоростями до 0,2 м/с при усилиях оператора не более 2% от веса груза.

На рис. 5 и 6 приведены осциллограммы изменения угла отклонения каната  $\gamma$  и усилия в канатной передаче  $T$  при свободных качаниях груза поперек моста для двух случаев, соответствующих максимальной и минимальной реализуемой жесткости на УОГ. Осциллограммы на рис. 5, а, б, а получены при следующих параметрах:  $m_o = 107,12$  кг,  $L = 0,858$  м,  $\rho_t = 6,55$  м; а на рис. 5, б, б:  $m_o = 47,40$  кг,  $L = 2,81$  м,  $\rho_t = 2,05$  м.

Анализ полученных осциллограмм на рис. 5, а и б показал, что при изменении параметров СКС изменяется период свободных качаний груза, что совпадает с расчетным периодом качаний груза  $T_{0\phi} = 2\pi \sqrt{\frac{J_{1\phi} J_{2\phi}}{(J_{1\phi} + J_{2\phi}) C_\phi}}$ , с отклонением не более 2%.

Из осциллограмм усилия в канатной передаче  $T$ , представленных на рис. 6, видно, что суммарный переходной процесс состоит из низкочастотных и высокочастотных колебаний. Анализ показал, что низкочастотные колебания обусловлены влиянием центробежной силы и изменением проекции веса груза при горизонтальных перемещениях груза в соответствии с выражением для  $M_{2z}$  (см. табл. 1), а высокочастотные колебания – моментом упругого взаимодействия  $M_{yz}$ .



Рис. 4. Устройство обезвешивания полезного груза

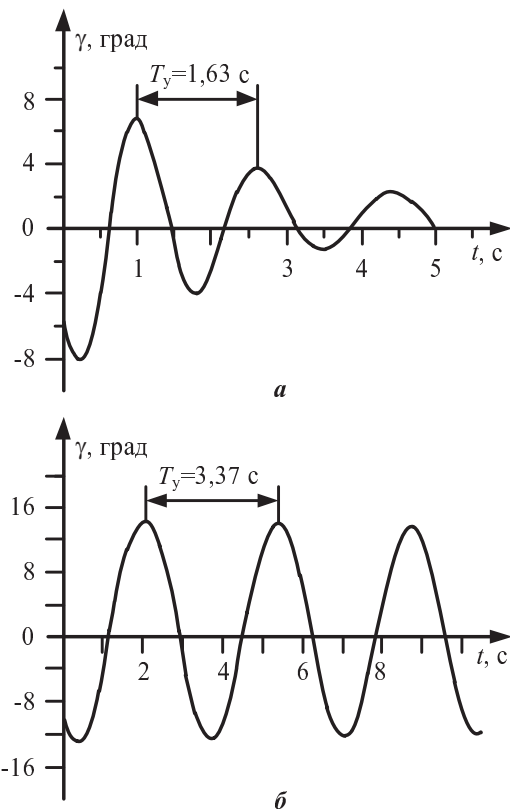


Рис. 5. Осциллограммы изменения угла отклонения каната от вертикали  $\gamma$  при свободных качаниях груза поперек моста

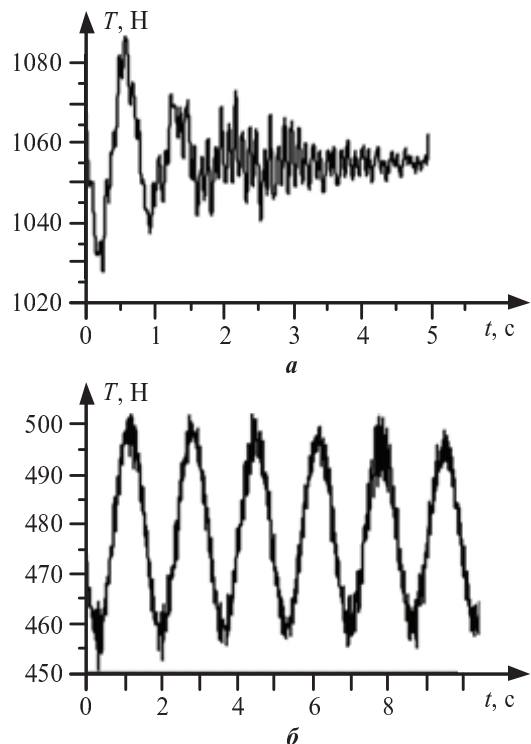


Рис. 6. Осциллограммы изменения усилия в канатной передаче  $T$  при свободных качаниях груза поперек моста

Так как составляющие момента  $M_{2z}$  обусловлены проекцией силы тяжести объекта обезвешивания на канат и действием центробежной силы, пропорциональной квадрату функции изменения угла, то данный момент изменяется с двойной частотой по отношению к частоте качаний груза, представленных на рис. 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Для разработки единого подхода к построению систем управления различными координатами стенов обезвешивания и обобщения результатов исследования упруго-силовых взаимодействий в СГП и СВП их математическую модель рекомендуется представить обобщенно, в виде эквивалентной двухмассовой ЭМС с упругой связью, при этом взаимное влияние координат удобно представить в виде добавочных сил, приложенных к соответствующим массам.

2. Анализ силовых взаимодействий, приведенных в **табл. 1**, проведенных экспериментальных исследований показал, что силовые взаимодействия между координатами СКС проявляется следующим образом:

– на движение тележки вдоль моста оказывает влияние сила упругого взаимодействия, сила трения и центробежная сила, действующая на тележку, зависящая от скорости вращения моста;

– на поворот моста относительно центральной оси оказывает влияние сила упругого взаимодействия, сила трения и кориолисова сила, действующая на тележку;

– на вращение барабана вокруг своей оси – сила упругого взаимодействия и сила трения;

– на перемещение объекта обезвешивания действуют силы упругого взаимодействия, гравитационные силы и инерционные силы.

3. Анализ выражений в **табл. 2** показал, что параметры привода барабана, моста и тележки зависят от массы обезвешиваемого груза и длины каната, а параметры привода моста, кроме того, и от положения тележки.

4. Для перехода к синтезу в виде ДЭМС необходимо проанализировать величины взаимовлияний и предусмотреть механизмы их компенсации.

*Результаты получены в рамках реализации проекта 585596-EPP-1-2017-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP Fostering Internationalisation in AgRicultural Engineering in Iran and Russia.*



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crew on the iss: creativity or determinism? / Krikalev S.K., Kalery A.Yu., Sorokin I.V. // Acta Astronautica. 2010. Vol. 66.

- № 1-2. P. 70-73. DOI.org/10.1016/J.Actaastro.2009.05.022.
2. Эксперименты с участием экипажей МКС для осуществления полета на марс / Крикалев С.К., Крючков Б.И., Курицын А.А., Харламов М.М. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 6-2. С. 278-288.
3. Conditions of optimization and efficiency of damping of oscillations of elastic mechanisms by an electric drive / Pyatibratov G.Y. // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. № 7. P. 373-378. DOI.org/10.3103/S1068371215070111.
4. Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А., Папирняк В.П. Способы реализации и направления совершенствования тренажеров для подготовки космонавтов к работе в невесомости // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. № 5. С. 70-76.
5. Пятибратов, Г.Я., Кравченко О.А., Денисов А.А. Реализация систем регулирования усилий электромеханических комплексов с упругими связями // Изв. вузов. Электромеханика. 1997. № 3. С. 51-54.
6. Силокомпенсирующие системы с электроприводами переменного тока тренажерных комплексов подготовки космонавтов / Д.В. Барыльник, Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: Ред. Журн. «Изв. Вузов. Электромеханика»: Лик, 2012. 176 с.
7. Synthesis of an object moving control system with flexible suspension under the action of external forces / Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 29-36. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.004.
8. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment / Pyatibratov G.Y., Bekin A.B., Bogdanov D.Y. // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 42-50. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006.
9. Принципы построения и реализация систем компенсации силы тяжести / Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я., Сухенко Н.А., Бекин А.Б. // Изв. вузов. Технические науки. 2013. № 2 (171). С. 32-35.
10. Кравченко О.А. Принципы построения многокоординатных силокомпенсирующих систем // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. № 3. С. 43-47.
11. Кравченко О.А., Богданов Д.Ю., Барыльник Д.В. Математическая модель электромеханической многокоординатной силокомпенсирующей системы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 1. С. 71-78.
12. Бекин А.Б., Пятибратов Г.Я., Шмат Р.А. Определение рациональной структуры системы управления перемещениями объектов на гибком подвесе // Изв. вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 2. С. 57-64. DOI:10.17213/0136-3360-2017-1-57-64
13. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
14. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / Иванов. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. Иваново, 2008. 298 с.

Поступила в редакцию 16 ноября 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

# MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMECHANICAL WEIGHTLESSNESS SIMULATORS TAKING ACCOUNT OF FORCE INTERACTIONS IN RADIAL CONSTRUCTION

Dmitriy Yu. Bogdanov

Postgraduate Student, the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation. E-mail: bogdanov\_dmitr@mail.ru

Oleg A. Kravchenko

D.Sc (Eng.), Associate Professor, Head of the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation. E-mail: mvk346428@gmail.com



Weightlessness simulators implemented with the use of multicoordinate force compensation systems (FCS) providing up to six degree of mobility of the object are used to train astronauts for extravehicular activity. The implementation of submotion at them is provided by the sum of three orthogonally related movements as well as the rotation and rolling of object in gimbal. It is necessary to create mathematical model, which describes force-interaction of multicoordinate FCS correctly in order to implement complex researches, control system synthesis, control static and dynamic indices of FCS work.

In our paper we formulated the assumptions used under the creation mathematical description of mechanical part of FCS. Four major interconnected elements were selected: a bridge, a truck, a drum and an offload object. The equations were obtained using the method of elementwise evaluation, which describes the coupled motion of the coordinates of the FCS on application of the external force to the object. With account for the control principles by electric motor and analysis of physical processes in the mechanical part of FCS, the authors substantiated the rationale of presenting the mathematical description of each coordinates of the FCS in terms of a generic two-mass electromechanical model with springy constraint.

In our paper we presented the analytical expressions for determination parameters of generic mathematical model and considered coordinates influence during the change of parameters and force interaction is also considered. Experimental researches of force interaction for the case of offload device when applying parameters of control object are considered.

**Keywords:** Weightlessness simulators, simulator, imitation weightlessness, force control, mathematical model.

## REFERENCES

1. Krikalev S.K., Kalery A.Yu., Sorokin I.V. Crew on the iss: creativity or determinism? *Acta Astronautica*, 2010, no. 1-2, vol. 66, pp. 70-73. DOI.org/10.1016/j.actaastro.2009.05.022.
2. Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Kuritsyn A.A., Kharlamov M.M. Experiments carried out by the ISS's crews in the interests of performing an exploration mission to mars. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula state university. Technical science], 2013, no. 6-2, pp. 278-288. (In Russian)
3. Pyatibratov G.Y. Conditions of optimization and efficiency of damping of oscillations of elastic mechanisms by an electric drive. *Russian Electrical Engineering*, 2015, no. 7, vol. 86, pp. 373-378. DOI.org/10.3103/S1068371215070111.
4. Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Papirnyak V.P. Ways of realization and directions of perfection of simulators for preparation of cosmonauts for work in weightlessness *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2010, no. 5, pp. 70-76. (In Russian)
5. Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Denisov A.A. Realization of systems of regulation of efforts of electromechanical complexes with elastic connections. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 1997, no. 3, pp. 51-54. (In Russian)
6. Barylnik D.V., Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A. *Sil'kompensiruyushchie Sistemy s Elektroprivodami Peremennogo Toka Trenazhernykh Kompleksov Podgotovki Kosmonavtov* [Force Balancing Systems with AC Electric Drives of Cosmonauts Training Complexes]. Novocherkassk, 2012, 176 p. (In Russian)
7. Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. Synthesis of an object moving control system with flexible suspension under the action of external forces. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 29-36. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.004.
8. Pyatibratov G.Y., Bekin A.B., Bogdanov D.Y. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 42-50. DOI.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006
9. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Y., Sukhenko N.A., Bekin A.B. The architecture and realization of systems compensating force of gravity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [University news. North-caucasian region. Technical sciences series], 2013, no. 2 (171), pp. 32-35. (In Russian)
10. Kravchenko O.A. Principles of construction of multicoordinate force compensating systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2008, no. 3, pp.43-47 (In Russian).
11. Kravchenko O.A., D.V. Barylnik, Bogdanov D.Y., Mathematical model of electromechanical multicoordinate force-compensation systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 71-78. (In Russian)
12. Bekin A.B., Pyatibratov G.Y., Shmat R.A. Determination of rational structure of control system moves objects with uses of flexible transmission. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2017, vol. 60, no. 2, pp. 57-64. (In Russian). DOI:10.17213/0136-3360-2017-1-57-64.
13. Kovach K.P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in alternating current machines]. Moscow, Gosenergoizdat, 1963, 744 p. (In Russian)
14. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electric drives]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute, 2008, 298 p. (In Russian)

Богданов Д.Ю., Кравченко О.А. Математическая модель электромеханических стенов обезвешивания с учетом силовых взаимодействий в радиальной конструкции // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 26-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-26-32)

Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A. Mathematical Model of Electromechanical Weightlessness Simulators Taking Account of Force Interactions in Radial Construction. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 26-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-26-32)