УДК 621.338.38

Н. Н. Пашков
Московский государственный университет путей сообщения

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дата поступления 10.08.2015
Решение о публикации 01.09.2015
Дата публикации 21.10.2015

***Аннотация*:** В работе рассматривается задача управления траекторией движения магнитолевитационного экипажа относительно программной траектории движения вдоль путевой структуры с учетом возмущения гравитационных и магнитных полей систем левитации, боковой стабилизации и тяги. Экипаж представлен как система твердых тел, движение которых подчиняется гравитационным и электромагнитным силам. При составлении расчетных уравнений динамики экипажа в качестве инерциальных координат центров масс твердых тел выбраны пространственные перемещения, ограниченные силами левитации и боковой стабилизации относительно дискретной путевой структуры. Для приведения точек приложения внешних сил к центру инерции экипажа выполнены преобразования координат произвольной точки на экипаже в локальной системе координат в систему координат, связанную с центром инерции экипажа. Общая модель динамики экипажа составлена на основе уравнения Лагранжа-Максвелла, которое связывает действующие на массы внешние силы тяготения, управляющие электромагнитные силы, силы инерции и трения. Кинетическая энергия механической системы определена в виде квадратичной формы проекций скоростей на оси неподвижной системы координат. Изменение потенциальной энергии магнитной левитации и боковой стабилизации при деформации объекта, или при смещении и вращении центра масс экипажа в трехмерном пространстве, моделируется магнитоупругими связями экипажа с путевой структурой. Для определения управляющих сил по заданной траектории движения экипажа решена обратная задача динамики. Уравнения движения магнитолевитационного экипажа линеаризованы относительно вектора приращений координат центров масс экипажа и представлены в форме уравнений фазового пространства состояний.

***Ключевые слова*:** Магнитолевитационный экипаж, программная траектория движения, профиль дискретной путевой структуры, адаптивное управление.

Nikolai N. Pashkov
Moscow State University of Railway Transport

EQUATION OF MOTION MAGNETIC LEVITATION ROLLING STOCK

***Abstract*:** This article deals with the problem of control the trajectory of the crew magnetic levitation relative trajectory of the software regarding the track structure of the perturbation of the gravitational and magnetic fields levitation systems, lateral stabilization and traction. The crew is presented as a system of rigid bodies, whose motion is subject to gravitational and electromagnetic forces. The spatial displacement with limited powers of levitation and lateral stabilization regarding a discrete track structure are selected by drawing up the estimated equations of the dynamics of the crew as inertial coordinates of the centers of mass of solids. The coordinates of any point on the carriage in a local coordinate system are converted in the coordinate system associated with the center of mass of the crew to bring the point of application of external force to the center of mass of the crew. A general model of the dynamics of the crew is based on the equation of Lagrange-Maxwell which binds to the active mass of the external forces of gravity that govern the electromagnetic force, the force of inertia and friction. The kinetic energy of the mechanical system is defined by the velocity projections on the axis of the fixed coordinate system as a quadratic form. The crew simulated magneto elastic coupling with the track structure changing the potential energy of magnetic levitation and lateral stabilization at the deformation of the object or the displacement and rotation of the center of mass of the crew in three-dimensional space. The inverse problem of dynamics is solved to determine the control forces for a given trajectory of the crew magnetic levitation. The equations of motion the crew on a magnetic cushion are linearized regarding increments relative coordinates of the centers of mass of the crew vector and presented in the form of equations of the phase space of states.

Keywords**:** The crew magnetic levitation, the trajectory of the program, the profile of the discrete track structure, the adaptive management.

Введение

Одним из этапов проектирования систем управления движением магнитолевитационного транспорта является решение задачи оптимального управления исполнительными подсистемами левитации, боковой стабилизации и тяги [1, 2, 3]. В работе рассматривается задача синтеза программной траектории для централизованного управления взаимосвязанными исполнительными подсистемами магнитолевитационного экипажа (МЛЭ).

Множество траекторий движения МЛЭ определяется внешней средой и профилем путевой структуры между станцией отправления и станцией назначения. В том случае, если известны характеристики профиля дискретной путевой структуры, то комфортные программные траектории движения можно задать вдоль всего пути следования на этапе проектирования системы управления.

Однако на траекторию движения МЛЭ, наряду с действием неконтролируемых внешних факторов, ощутимо влияют кривые участки пути, уклоны и другие особенности путевой инфраструктуры, которые возбуждают собственные и вынужденные колебания экипажа в шести степенях подвижности. Среди наиболее опасных для устойчивости движения МЛЭ являются сложные формы колебаний «виляния», «галопирования» и «боковой качки» [4, 5].

В общем случае задача планирования и разделения траекторий движения по степеням подвижности МЛЭ при синтезе законов управления исполнительными подсистемами может не иметь аналитических решений, или иметь множество неоднозначных решений, среди которых есть единственное оптимальное решение.

В настоящей работе рассматривается аналитическое решение задачи управления магнитолевитационным экипажем. Для синтеза законов автоматического управления исполнительными подсистемами разработан общий алгоритм вычисления траекторий движения МЛЭ в поле потенциальных сил.

Общая модель динамики магнитолевитационного экипажа

Для составления расчетных уравнений динамики представим МЛЭ как систему твердых тел, движение которых подчиняется гравитационным и электромагнитным силам.

Выберем в качестве инерциальных координат центров масс твердых тел m_i пространственные перемещения q_{ix}, q_{iy}, q_{iz}, ограниченные силами левитации относительно дискретной путевой структуры и силами боковой стабилизации с коэффициентами жесткости $p_{ij}(i,\ j=1,\dots,n)$ и p_k. На массы действуют внешние силы тяготения, управляющие силы u_i и силы трения. Движение МЛЭ также зависит от внутренних процессов диссипации и сил инерции.

Кинетическая энергия механической системы определяется в виде квадратичной формы проекций скоростей на оси неподвижной системы координат $x,\ y,\ z$:

$$\mathbf{K}(\dot{\boldsymbol{q}}) = 0{,}5\sum_{i=1}^{n} m_i(\dot{q}_{ix}^2 + \dot{q}_{iy}^2 + \dot{q}_{iz}^2) = 0{,}5\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}\dot{\boldsymbol{q}}, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{q} = [q_{1x}, q_{1y}, q_{1z}, \dots, q_{ix}, q_{iy}, q_{iz}, \dots, q_{nz}]^{\mathrm{T}}$ – $3n$-мерный вектор проекций перемещений n масс на инерциальные оси;

$\mathbf{A} = diag\{m_1, m_1, m_1, \dots, m_i, m_i, m_i, \dots, m_n\} > 0$ – матрица инерции соответствующей размерности (диагональная, положительно определенная).

Потенциальная энергия связей

При деформации объекта массы m_i, m_j смещаются в трехмерном пространстве из состояний равновесия A_0, B_0 вдоль векторов $\boldsymbol{q}_i$, $\boldsymbol{q}_j$, занимая положения A, B, соответственно. При этом изменение потенциальной энергии магнитной левитации и боковой стабилизации, линеаризованное по приращениям $(x_i^0 - x_j^0)$, $(x_i - x_j)$, $(y_i^0 - y_j^0)$, $(y_i - y_j)$, $(z_i^0 - z_j^0)$, $(z_i - z_j)$, может быть определено следующим образом:

$$\mathbf{\Pi}(\boldsymbol{q}) = 0{,}5\sum_{\mathbf{l}}^{h}\{\mathbf{\Pi}_{ij}^{\text{лин}}(\boldsymbol{q}_i, \boldsymbol{q}_j)\}_{\mathrm{l}} + 0{,}5\sum_{k=1}^{s}\mathbf{\Pi}_k^{\text{лин}}(\boldsymbol{q}_k) = 0{,}5\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\boldsymbol{q}\,, \tag{2}$$

где $\mathbf{C} = \{\mathbf{C}_{ij}\}$, $\mathbf{C}_{ij} = \mathbf{C}_{ji} = -\mathbf{P}_{ij}$, $\mathbf{C}_{ii} = \mathbf{P}_i + \sum\limits_{j=1,\, i\neq j}^{n} \mathbf{P}_{ij}$, $i, j = 1, ..., n$;

$\mathbf{C} \geq 0$ – $(3n \times 3n)$-мерная матрица коэффициентов электромагнитной упругости;

h – число катушек дискретной путевой структуры подвеса; s – число катушек боковых стабилизаторов;

$\mathbf{\Pi}_{ij}^{\text{лин}}(\boldsymbol{q}_i, \boldsymbol{q}_j) = 0{,}5(\boldsymbol{q}_i - \boldsymbol{q}_j)^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_{ij}(\boldsymbol{q}_i - \boldsymbol{q}_j)$ – потенциальная энергия ij-го магнитного подвеса;

$\mathbf{\Pi}_k^{\text{лин}}(\boldsymbol{q}_k) = 0{,}5\boldsymbol{q}_k{}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\boldsymbol{q}_k$ – потенциальная энергия k-го магнитного стабилизатора;

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} p_{ij}^{xx} & p_{ij}^{xy} & p_{ij}^{xz} \\ p_{ij}^{xy} & p_{ij}^{yy} & p_{ij}^{yz} \\ p_{ij}^{xz} & p_{ij}^{yz} & p_{ij}^{zz} \end{bmatrix},\quad \mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} p_k^{xx} & p_k^{xy} & p_k^{xz} \\ p_k^{xy} & p_k^{yy} & p_k^{yz} \\ p_k^{xz} & p_k^{yz} & p_k^{zz} \end{bmatrix},$$

– $(3n\times3n)$-мерные симметричные матрицы приведенных параметров ij-х магнитных подвесов и k-х боковых стабилизаторов.

Силы сопротивления движению

Диссипативная функция внешних сил с коэффициентами d_{ix}, d_{iy}, $d_{iz} \geq 0$ при проекциях скоростей $\dot{q}_{ix}, \dot{q}_{iy}, \dot{q}_{iz}$ масс m_i $(i = 1, ..., n)$, равна:

$$\mathbf{R}_d(\dot{\boldsymbol{q}}) = 0{,}5\sum(d_{ix}\dot{q}_{ix}^2 + d_{iy}\dot{q}_{iy}^2 + d_{iz}\dot{q}_{iz}^2) = 0{,}5\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_d\dot{\boldsymbol{q}}\,, \tag{3}$$

где $\mathbf{R}_d = \mathrm{diag}\{d_{1x}, d_{1y}, d_{1z}, ..., d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}, ..., d_{nz}\}$, $\mathbf{R}_d \geq 0$ – диагональная матрица коэффициентов внешних сил сопротивления движению, а d_{ix}, d_{iy}, d_{iz} не обязательно различные.

Диссипативная функция внутренних сил в пространственных связях с коэффициентами $b_{ij} \geq 0$ при скоростях деформаций левитационных зазоров $(\dot{\boldsymbol{q}}_i - \dot{\boldsymbol{q}}_j)$ и с коэффициентами $b_k \geq 0$ при скоростях деформаций зазоров стабилизаторов $(\dot{\boldsymbol{q}}_k - \dot{\boldsymbol{q}}_0)$ представляется в виде суммы:

$$\mathbf{R}_b(\dot{\boldsymbol{q}}) = 0{,}5\sum_{l=1}^{h}\{(\dot{\boldsymbol{q}}_i - \dot{\boldsymbol{q}}_j)^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_{ij}(\dot{\boldsymbol{q}}_i - \dot{\boldsymbol{q}}_j)\}_l + 0{,}5\sum_{k=1}^{s}\dot{\boldsymbol{q}}_k^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_k\dot{\boldsymbol{q}}_k = 0{,}5\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_b\dot{\boldsymbol{q}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_b \geq 0, \mathbf{R}_{ij}, \mathbf{R}_k$ – $(3n \times 3n)$-мерные матрицы приведенных коэффициентов диссипации ij-й пространственной связи и k-го стабилизатора. Структура матриц диссипации аналогична расчетным структурам матриц $\mathbf{C}$, $\mathbf{P}_{ij}$, $\mathbf{P}_k$.

Вектор обобщенных сил $\boldsymbol{U}$ составляется из проекций на инерциальные оси приложенных к массам m_i внешних сил $\boldsymbol{u}_i (i = 1, ..., n)$, включая управления:

$$\boldsymbol{U} = [u_{1x}, u_{1y}, u_{1z}, ..., u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}, ..., u_{nz}]^{\mathrm{T}}. \quad (5)$$

Линейная модель динамики МЛЭ

Уравнение Лагранжа-Максвелла для механического объекта с кинетической и потенциальной энергиями (1), (2), диссипативными функциями (3), (4) и обобщенными силами (5) имеет векторно-матричный вид [6]:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial 0{,}5(\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}\dot{\boldsymbol{q}})}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right] = \boldsymbol{U} - \frac{\partial 0{,}5(\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\boldsymbol{q})}{\partial \boldsymbol{q}} - \frac{\partial 0{,}5[\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}(\mathbf{R}_d + \mathbf{R}_b)\dot{\boldsymbol{q}}]}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}. \quad (6)$$

Это уравнение движения МЛЭ относительно переменных задачи, приводится к $3n$-мерной системе линейных дифференциальных уравнений второго порядка с интервально неопределенными элементами матриц **A**, **R**, **C**:

$$\mathbf{A}\ddot{\boldsymbol{q}} + \mathbf{R}\dot{\boldsymbol{q}} + \mathbf{C}\boldsymbol{q} = \boldsymbol{U}, \quad (7)$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{R}$, $\mathbf{C}$ – $(3n \times 3n)$-мерные симметричные матрицы;
$\mathbf{A} > 0$ – матрица масс;
$\mathbf{R} = \mathbf{R}_d + \mathbf{R}_b \geq 0$ – матрица параметров диссипации;
$\mathbf{C} \geq 0$ – матрица коэффициентов магнитоупругости.

Выбор локальных систем координат

Для приведения точек приложения внешних сил к центру инерции МЛЭ, необходимы преобразования координат произвольной точки на МЛЭ в локальной системе координат в систему координат, связанную с центром инерции МЛЭ. Закрепим в центрах масс m_i МЛЭ правые декартовые системы координат $O_i x_i y_i z_i$ следующим образом: начало координат O_i совместим с центром инерции массы m_i, оси z_i направим параллельно оси z_0 инерциальной системы координат. Оси x_i направим перпендикулярно к осям z_{i-1} и z_i (вдоль продольной оси симметрии массы МЛЭ) с положительным направлением от массы $i-1$ к массе i, ось y_i дополняет систему координат $O_i x_i y_i z_i$ до правой декартовой системы координат.

При помощи такого ортогонального преобразования движение твердого тела m_i разделяется на поступательное и вращательное. Перемещение i-й системы относительно $i-1$-й характеризует движение i-й массы относительно $i-1$-й. Это движение массы m_i состоит из поступательного перемещения s_{xi}, s_{yi}, s_{zi} вдоль осей $x_i y_i z_i$ и вращательного относительно центра массы m_i. Матрицы вращения вокруг осей декартовой системы координат на углы a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} в трехмерном пространстве известны [7]:

$$\boldsymbol{\tau}_{xi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_{xi} & -\sin a_{xi} \\ 0 & \sin a_{xi} & \cos a_{xi} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\tau}_{yi} = \begin{bmatrix} \cos a_{yi} & 0 & \sin a_{yi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin a_{yi} & 0 & \cos a_{yi} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\tau}_{zi} = \begin{bmatrix} \cos a_{zi} & -\sin a_{zi} & 0 \\ \sin a_{zi} & \cos a_{zi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Итоговая матрица поворотов осей i-й системы координат относительно $i-1$-й определится произведением матриц вращения:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \boldsymbol{\tau}_{xi} \boldsymbol{\tau}_{yi} \boldsymbol{\tau}_{zi}.$$

Таким образом, связь между локальными координатами $x_i = \left[x_i \; y_i \; z_i \right]^{\mathrm{T}}$ некоторой точки в i-й и $i-1$ системах координат определится преобразованием:

$$\boldsymbol{x}_{i-1} = \boldsymbol{\tau}_{i-1,i}\boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{s}_{i-1,i},$$

где $\boldsymbol{x}_i$ – координаты точки в i-й системе координат;

$\boldsymbol{x}_{i-1}$ – координаты точки в $i-1$-й системе координат;

$\boldsymbol{\tau}_{i-1,i}$ – матрицы поворотов осей $i-1$-й системы координат относительно i-й;

$\boldsymbol{s}_{i-1,i}$ – вектор переноса.

Координаты точек приложения внешних сил в основной системе координат O, x_0, y_0, x_0 определяются по формулам:

$$\boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{\tau}_{0,i}\boldsymbol{x}_i + \sum\nolimits_{j=1}^{i} \boldsymbol{s}_{j-1,j},$$

$$\boldsymbol{\tau}_{0,i} = \prod\nolimits_{j=1}^{i} \boldsymbol{\tau}_{j-1,j}, \; i = 1, 2, \ldots,$$

где $\boldsymbol{\tau}_{0,i}$ – матрица поворотов i-й системы координат относительно основной;

$\sum\nolimits_{j=1}^{i} \boldsymbol{s}_{j-1,j}$ – вектор переноса начала координат i-й системы относительно основной.

Однородные координаты точки $\boldsymbol{x}_i$ в инерциальной системе координат O, x_0, y_0, z_0, связанной с основанием МЛЭ, определяются по формуле:

$$\boldsymbol{x}_i = \mathbf{T}_{0i} \cdot \boldsymbol{q}_i,$$

где $\mathbf{T}_{0i}$ – матрица перехода от i-й системы координат к O, x_0, y_0, z_0;

$\mathbf{T}_{i-1,i} = \mathbf{T}_{i,i-1}^{-1}$ – матрицы обратного перехода из i в $i-1$ систему координат.

В однородных координатах матрицы переходов имеют блочную структуру:

$$\mathbf{T}_{i,i-1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{i,i-1} & \mathbf{s}_{i,i-1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}.$$

Оптимальная траектория движения МЛЭ

Для комфортного движения МЛЭ, имеющего шесть степеней подвижности, необходимо задать желаемую пространственную траекторию движения с учетом особенностей дискретной путевой структуры. В качестве обобщенных координат выберем фазовые координаты $\mathbf{x}$ пространства состояний МЛЭ. Для определения управляющих сил, исходя из желаемой траектории движения МЛЭ с помощью матриц ортогонального преобразования $\mathbf{T}_{0i}$, необходимо решить обратную задачу динамики.

Решение обратной задачи состоит в решении системы трансцендентных уравнений, относительно вектора фазовых координат $\mathbf{x}$, по заданным инерциальным координатам пространственных перемещений $\boldsymbol{q}$ центра масс МЛЭ с помощью системы трансцендентных уравнений:

$$\boldsymbol{q} = \mathbf{F}(\theta), \tag{8}$$

где $\mathbf{F}(\theta)$ – вектор функций нелинейных связей физических переменных θ с пространственными перемещениями $\boldsymbol{q}$.

Общего метода аналитического решения систем трансцендентных уравнений нет. В этой связи множество решений обратной задачи динамики найдем из линеаризованной системы уравнений относительно приращений вектора пространственных перемещений $\boldsymbol{q}$ и физических переменных θ:

$$\boldsymbol{q} = \mathbf{J}(\theta) \cdot \theta, \tag{9}$$

где $\mathbf{J}(\theta) = \dfrac{\partial \mathbf{F}(\theta)}{\partial \theta^{\mathrm{T}}}$ – матрица Якоби. Эта система уравнений всегда разрешима в силу избыточности уравнений (9) и независимости обобщенных координат θ.

Из уравнений (9) по заданной в инерционных координатах траектории движения МЛЭ $\boldsymbol{q}(t)$:

$$\mathrm{J}^{-1}(\theta) \cdot \boldsymbol{q}(t) = \theta(t), \;\; t \in \Delta_t = [t_0, \, t_i], \tag{10}$$

можно определить законы управления физическими переменными.

Уравнение движения МЛЭ в пространстве состояний

Важным свойством уравнения (7) является положительная определенность матрицы $\mathbf{A}$. Это свойство гарантирует существование единственной обратной матрицы $\mathbf{A}^{-1}$, с помощью которой уравнение (7) можно разрешить относительно старшей производной и записать его в виде:

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \mathbf{A}^{-1}\left[\boldsymbol{U} - (\mathbf{R}\dot{\boldsymbol{q}} + \mathbf{C}\boldsymbol{q})\right]. \qquad (11)$$

Уравнения модели динамики МЛЭ (11) в обобщенных координатах θ с учетом (9) преобразуются к системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{d^2}{dt^2}[\mathbf{J}(\theta)\cdot\theta] = \mathbf{A}^{-1}\left[\boldsymbol{U} - \left(\mathbf{R}\frac{d}{dt}[\mathbf{J}(\theta)\cdot\theta] + \mathbf{C}\mathbf{J}(\theta)\cdot\theta\right)\right]. \qquad (12)$$

Введем обозначения для переменных состояния $\boldsymbol{x}_1 = \theta$, $\boldsymbol{x}_2 = \dot{\theta}$ и, полагая значения элементов матрицы $\mathbf{J}(\theta)$ в точке линеаризации постоянными, преобразуем уравнения (12) к нормальной форме Коши:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{x}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{J}^{-1}(\theta)\mathbf{A}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{J}(\theta) & \mathbf{J}^{-1}(\theta)\mathbf{A}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{J}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_1 \\ \boldsymbol{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{J}^{-1}(\theta)\mathbf{A}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{U}. \qquad (13)$$

где $\mathbf{B}$ – оператор динамической модели тягового линейного электропривода [8].

Заключение

Из структуры уравнений (13) следует, что систему управления переменными состояния МЛЭ $\boldsymbol{x}_2 = \dot{\theta}$ целесообразно строить адаптивными методами [9]. Цель автоматического адаптивного управления в этом случае достигается непрерывной настройкой параметров матрицы управления $\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{A}^{-1}$ модели (13) вдоль траектории $\boldsymbol{\theta}(t)$, или подавлением возмущений траектории движения МЛЭ относительно программной траектории оптимальными управляющими силами.

Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев ; под ред. В. А. Гапановича. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.

2. Braunbek W. Frieschwebende Köper im elektrischen und magnetischen Feld // Phisikalische Zeitschrift. 1939. Bd. 112. – S. 753.

3. Sotelo, G. G. MagLev Cobra: Test Facilities and Operational Experiments / G. G. Sotelo, D. H. N. Dias, R. A. H. de Oliveira, A. C. Ferreira, R. De Andrade Jr, R. M. Stephan // Journal of Physics Conference Series 05/2014; 507(3).

4. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с.

5. Dias D. H. N. Dynamical Tests in a Linear Superconducting Magnetic Bearing / D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, F. Sass, E. S. Motta, R. de Andrade Jr, R. M. Stephan // Physics Procedia 12/2012 36:1049-1054.

6. Борцов Ю. А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 216 с.

7. Пашков Н. Н. Аналитический синтез оптимальных траекторий про-граммного движения многозвенных манипуляторов / Мехатроника. Автоматизация. Управление. – М. : 2008, № 9, Робототехнические комплексы. – С. 10–15.

8. Пашков Н. Н. Система адаптивного управления тяговым асинхронным электроприводом / Труды Международной научно-техн. конф. «Подвижной состав XXI века». – Хабаровск: ДВГУПС, 2008. – С. 52–56.

9. Пашков Н. Н. Ассоциативный принцип адаптации управления магнитолевитационным транспортом / Труды 2-й Международной научной конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» МТСТ’14 // Под ред. Ю. Ф. Антонова. – Киров : МЦНИП, 2014. – С. 287–295.

References

1. Antonov Y. F., Zaitsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magneto-levitation transportation]. Moscow, 2014. 476 p.

2. Braunbek W. *Phisikalische Zeitschrift – Physical magazine,* 1939, vol. 112, p. 753.

3. Sotelo G. G., Dias D. H. N., de Oliveira R. A. H., Ferreira A. C., de Andrade R. Jr., Stephan R. M. *Journal of Ph. Conf. Series* 05/2014, Rio de Janeiro, vol. 507, no. 3.

4. Verigo M. F., Cogan A. J. *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction track and railway rolling stock]. Moscow, 1986. 559 p.

5. Dias D. H. N., Sotelo G. G., Sass F., Motta E. S., De Andrade R. Jr., Stephan R. M. *Physics Procedia* 12/2012, no. 36, pp. 1049–1054.

6. Bortsov Yu. F., Polyakhov N. D., Putov V. V. *EHlektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Leningrad, 1984. 216 p.

7. Pashkov N. N. *Mekhatronika. Avtomatizaciya. Upravlenie – Mechatronics. Automation. Control,* Moscow, 2008, no. 9, pp. 10–15.

8. Pashkov N. N. Sistema adaptivnogo upravleniya tyagovym asinhronnym ehlektroprivodom [Adaptive Control traction asynchronous electric drive] *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii*

"*Podvizhnoj sostav XXI veka*" (Proc. of the Int. Sc. and Techn.Conf. "The rolling stock of the XXI century"). Khabarovsk, 2008, pp. 52–56.

9. Pashkov N. N. Associativnyj princip adaptacii upravleniya magnitolevitacionnym transportom [Associative principle of magnetic levitation adaptation of transport]. *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii” MTST’14* (Proc. of the 2nd Int. Sc. Conf. "Magnetic levitation

Сведения об авторе:

ПАШКОВ Николай Николаевич, д. т. н., профессор кафедры «Логистические транспортные системы и технологии», Институт управления и информационных технологий (ИУИТ) Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), E-mail: pashkovnn@gmail.com

Information about author:

Nikolai N. PASHKOV, Ph. D., professor of «Logistic transport systems and technologies», Institute of Management and Information Technology (IUIT) Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), E-mail: pashkovnn@gmail.com