

В. А. ПОЛЯКОВ, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ (Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск)

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Визначено та описано фактори, які ускладнюють обстановку руху магнітолевітуючого поїзда. Відзначено вплив цих ускладнень на задачу його руху. Констатовано неможливість парирування описаної колізії без радикального підвищення його динамічних ресурсів. Доведено, що керованість системи досяжна лише за умови подолання її надлишкових ступенів свободи. Простежено раціональний шлях такого подолання. Розроблено методику побудування руху поїзда у непередбачуваній обстановці, що враховує його особливості.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, побудування руху, непередбачувана обстановка руху

Определены и описаны факторы, усложняющие обстановку движения магнитолевитирующего поезда. Отмечено влияние этих осложнений на двигательную задачу поезда. Констатирована невозможность парирувания описанной коллизии без радикального повышения его динамических ресурсов. Показано, что управляемость системы достижима лишь при условии преодоления её избыточных степеней свободы. Прослежен рациональный путь такого преодоления. Разработана методика построения движения поезда в непредсказуемой обстановке, учитывающая его особенности.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд, построение движения, непредсказуемая обстановка движения

Factors, which complicate the situation of magnetic levitated train motion, are revealed and described. Influence of these complications on motion problems of a train is noted. The impossibility of parrying of the described collision without a radical rising of dynamic resources of a train is stated. It is shown that the achievement of controllability of the system is possible only if the overcoming of surplus degrees of its freedoms is achieved. The rational way of such an overcoming is shown. The technique of construction of the train motion in unpredictable conditions, which considers features of such a construction, is developed.

Keywords: magnetic levitated train, construction of motion, unpredictable conditions of motion

Интенсификация перевозочного процесса приводит к значительному обострению внутренней и внешней обстановки движения магнитолевитирующего поезда (МЛП). Это, в свою очередь, усложняет его двигательные задачи (ДЗ) как структурно, так и функционально. Лавинообразно нарастает разнообразие реакций, требуемых от артефакта для сохранения требуемого качества движения. К этим реакциям предъявляются всё более высокие требования дифференцированности и точности. Осложняется их смысл. Одновременно среди ДЗ МЛП постоянно растёт число задач непредсказуемых, разовых, экстенпоральных – взамен предсказуемых, стандартных, паттерных. Парировать описанную коллизию невозможно без радикального повышения динамических ресурсов поезда.

Механические и электромагнитные системы, которые могут быть приняты в качестве адекватных расчётных схем соответствующих подсистем МЛП, как правило, являются большими и во многих смыслах сложными. Обычно они не стационарны, сугубо не линейны, не го-

лономны, многосвязны и обладают множеством избыточных степеней свободы. Большинство ограничений, накладываемых на изменение их координат, носят динамический, а не аналитический характер. Поэтому связями, строго говоря, такие ограничения не являются [1] и не сокращают число степеней свободы своих систем. Достигнуть управляемости таких систем возможно лишь, преодолев упомянутые избыточные степени свободы [2].

Для подавляющего большинства ныне существующих технических систем традиционным путём такого преодоления является введение в них дополнительных аналитических связей, как правило, имеющих контактную натурную реализацию. Это – хотя и возможный, однако весьма примитивный и не выгодный во многих смыслах путь разрешения очерченной проблемы. Для МЛП он, очевидно, приемлемым не является, тем более что в основу концепции такого поезда положен бесконтактный – полевой – принцип динамического воздействия на глобальное положение и ориентацию экипажей [3].

Гораздо более рациональным и приемлемым для МЛП способом преодоления избыточных степеней свободы расчётной схемы (РС) его механической подсистемы (МПС) является координата её движений [4], их построение в форме динамически устойчивых, целостно слитных, структурно единых синергий. Для этого, прежде всего, эта подсистема должна иметь специально созданную структурно-параметрическую организацию, конгруэнтную такому способу управления ею.

Управляемое возмущённое движение РС МПС МЛП может быть описано моделью:

$$a_{\lambda\mu} \cdot \eta^\mu = E_\lambda + \Pi_\lambda;$$

$$a_{\lambda\mu} = c_{\lambda\mu} \cdot p^{(2)} + (C_{\lambda,\mu\nu} \cdot \eta^\nu + \beta_{\lambda\mu}) \cdot p + l_{\lambda\mu};$$

$$p = \frac{d}{dt} \quad \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}], \quad (1)$$

где $c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu}, E_\lambda, \Pi_\lambda \quad \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}]$ – ковариантный метрический тензор агрегата, выбранного в качестве этой РС, трехиндексный символ Кристоффеля первого рода такого агрегата в координатах $\eta^\lambda \quad \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$, а также сопряжённые с ними обобщённые возмущающие и управляющие силы; $\beta_{\lambda\mu}, l_{\lambda\mu} \quad \forall \lambda, \mu \in [\overline{1, L}]$ – диссипативные и квазиупругие коэффициенты модели; L, t – число степеней свободы упомянутого агрегата, а также время. Значения $c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu}, \beta_{\lambda\mu}, l_{\lambda\mu} \quad \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}]$ зависят от параметров и структуры РС МПС МЛП. Если уравнения этой модели упорядочены, то коэффициенты $a_{\lambda\lambda} \quad \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$ характеризуют динамические качества каналов подсистемы, соответствующих её координатам. Коэффициенты же $a_{\lambda\mu} \quad \forall \lambda \neq \mu; \lambda, \mu \in [\overline{1, L}]$ характеризуют взаимодействие таких каналов. Кроме того, имеют место соотношения:

$$E_\lambda = S_\lambda^\alpha \cdot Q_\alpha; \quad \Pi_\lambda = S_\lambda^\alpha \cdot V_\alpha \\ \forall \alpha \in [\overline{1, N}]; \lambda \in [\overline{1, L}], \quad (2)$$

где $Q_\alpha, V_\alpha \quad \forall \alpha \in [\overline{1, N}]$ – векторные (непосредственно реализуемые) возмущающие и управляющие воздействия на МПС МЛП; $N, S_\lambda^\alpha \quad \forall \alpha \in [\overline{1, N}], \lambda \in [\overline{1, L}]$ – число опорных координат её РС, а также структурная матрица агрегата, принятого в её качестве. Поэтому степень

влияния возмущающих $Q_\alpha \quad \forall \alpha \in [\overline{1, N}]$ и управляющих $V_\alpha \quad \forall \alpha \in [\overline{1, N}]$ воздействий на каналы подсистемы также зависит от ее структуры. Иными словами, результатом любой особенности РС МПС МЛП, ведущей к взаимосвязанности ее координат, является недиагональность матрицы $\{a_{\lambda\mu} \quad \forall \lambda, \mu \in [\overline{1, L}]\}$. Исходя из этого, степень связанности упомянутых координат можно эффективно характеризовать значениями элементов $a_{\lambda\mu} \quad \forall \lambda \neq \mu; \lambda, \mu \in [\overline{1, L}]$ этой матрицы.

Преодоление избыточных степеней свободы РС МПС МЛП может быть инициировано использованием многоканальных регуляторов, которые, помимо каналов автономного управления, содержат дополнительные внешние перекрестные связи каналов. Указанные внешние связи, дополняя имеющиеся внутренние перекрестные связи управляемого объекта, должны создавать достаточные условия для внутригруппового согласования его связываемых фазовых координат. Поведение же каждой согласуемой группы таких координат, свобода изменения которых ограничена межканальными связями, должно быть эквивалентно поведению единого канала. Тогда оно может синтезироваться методами, соответствующими лишь требованиям к качеству координированного движения.

Конкретизируем приведенные качественные соображения. Для этого разделим $2 \cdot L$ управляемых компонентов вектора состояния МПС поезда $\gamma^\rho = \{\eta^\lambda, \dot{\eta}^\lambda \quad \forall \lambda \in [\overline{1, L}]\} \quad \forall \rho \in [\overline{1, 2 \cdot L}]$ на две макрогруппы. В первую из них включим J таких компонентов, требующих автономного управления ими. К ним могут, например, относиться пути, пройденные центрами масс экипажей поезда, углы, определяющие ориентации их кузовов, а также производные этих величин по времени. Во вторую же из упомянутых макрогрупп включим $K = 2 \cdot L - J$ компонентов, подлежащих (хотя бы частичному) преодолению и составляющих группы координат, требующих внутригрупповой координации.

Внутри первой макрогруппы могут встречаться имманентно взаимосвязанные координаты. Стремление к изоляции соответствующих им каналов, стимулированное желанием упростить управление указанными координатами, может акцентироваться условиями нежелательности (или даже недопустимости) их взаимовлияния. Тогда разделение может быть достиг-

нуто, например, исходя из следующего. Как показано, условием независимости λ -го канала системы относительно μ -го является соблюдение соотношения

$$a_{\lambda\mu} \equiv 0; \lambda \neq \mu. \quad (3)$$

Совокупность выражений (1) и (3) позволяет находить для системы структурные и параметрические решения, реализация которых гарантирует полную сепарацию каналов, взаимодействия которых нежелательно.

Из принятого принципа разделения фазовых координат системы на описанные макрогруппы следует, что в части, соответствующей первой такой макрогруппе, построение движения может быть с успехом выполнено методами одноканального управления. Требуемый закон движения в части каждой из фазовых координат $\gamma^\rho = \{\eta^\lambda, \dot{\eta}^\lambda \forall \lambda \in \overline{[1, J/2]}\} \forall \rho \in \overline{[1, J]}$, подлежащих автономному управлению ими, может обеспечиваться, например, с помощью игровых минимаксных [5], а также терминальных [6] методов управления, концептуально гарантирующих заданное качество этого движения. Стратегии управления этими фазовыми координатами должны определяться из решения игровых минимаксных задач, задаваемых моделью (1), а также соотношениями вида

$$\gamma^\rho(t) \in \Gamma_\rho \forall t \in [t_s, \tau], \rho \in \overline{[1, J]}; \quad (4)$$

$$V_\rho^p(t) \in \Lambda_\rho^p \forall t \in [t_s, \tau], \rho \in \overline{[1, J]}; \quad (5)$$

$$\gamma^\rho(\tau) \in \Theta_\rho \forall \rho \in \overline{[1, J]}; \quad (6)$$

$$w_\rho(t) \in W_\rho \forall t \in [t_s, \tau], \rho \in \overline{[1, J]} \quad (7)$$

согласно выражениям:

$$I_\rho^p = \inf_{V_\rho^p(\bullet), w_\rho(\bullet)} \sup_{t_s} \int_{t_s}^{\tau} \lambda_\rho [V_\rho^p(\bullet), w_\rho(\bullet)] \cdot dt$$

$$V_\rho^p(\bullet) \in \Lambda_\rho^p, w_\rho(\bullet) \in W_\rho, t \in [t_s, \tau]$$

$$\forall \rho \in \overline{[1, J]}, \quad (8)$$

где $I_\rho^p \forall \rho \in \overline{[1, J]}$ – показатели качества программных управлений $V_\rho^p(\bullet) \forall \rho \in \overline{[1, J]}$; $\lambda_\rho \forall \rho \in \overline{[1, J]}$ – заданные функции своих аргументов. В соотношениях (4)...(7) дополнитель-

но обозначено: $\Gamma_\rho, \Lambda_\rho^p, W_\rho$ – заданные замкнутые множества, ограничивающие допустимые состояния и программные управления подсистемы, соответствующей ρ -ой управляемой фазовой координате, а также возможные реализации её возмущений; $\Theta_\rho, [t_s, \tau]$ – целевое множество движения по ρ -ой фазовой координате и его терминальный интервал. Здесь везде функция с точкой на месте аргумента означает всю совокупность её возможных значений, как единое целое. Такие программные движения $\gamma^{\rho p}(t) \forall \rho \in \overline{[1, J]}, t \in [t_s, \tau]$ оптимальны по критериям $I_\rho^p \forall \rho \in \overline{[1, J]}$ при любых возмущениях $w_\rho(t) \in W_\rho \forall t \in [t_s, \tau], \forall \rho \in \overline{[1, J]}$.

Входящие во вторую макрогруппу компоненты фазового вектора, как указано, составляют группы, требующие внутригрупповой координации. Для любой i -ой из этих групп $\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\Phi_i, \Delta_i]$ такое требование может быть формализовано соотношениями

$$\Phi_{ij}(\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\Phi_i, \Delta_i]) = 0$$

$$\forall j \in \overline{[1, H_i]}; \Delta_i - \Phi_i = G_i, \quad (9)$$

где $\Phi_{ij} \forall j \in \overline{[1, H_i]}$ – операторы (конечные, дифференциальные, интегро-дифференциальные или иные), воздействующие на координаты $\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\Phi_i, \Delta_i]$; Φ_i, Δ_i – начальный и конечный порядковые номера таких координат среди $\gamma^\lambda \forall \lambda \in \overline{[1, 2 \cdot L]}$; G_i, H_i – числа координат, входящих в i -ю группу, а также ограничений, накладываемых на них условиями согласования.

Выдвинутое требование эквивалентности поведения группы согласуемых координат и единого канала удовлетворимо лишь, если

$$H_i = G_i - 1. \quad (10)$$

Если же фактически для группы координат $H_i < G_i - 1$, то результирующему координированному движению могут быть приданы новые полезные качества путем наложения дополнительных $D_i = G_i - (H_i + 1)$ ограничений на такие согласуемые координаты. Если же, напротив, $H_i > G_i - 1$, то «избыточные» $P_i = H_i - (G_i - 1)$ ограничений должны быть отброшены. Однако, в любом случае, все ограничения (9) должны быть непротиворечивыми. В про-

тивном случае согласованное движение нереализуемо.

Выражения (9) и (10) определяют поведение i -ой группы согласуемых координат с точностью до одной управляемой переменной

$$\sigma_i = \sigma_i(\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Delta_i}]), \quad (11)$$

которую назовем агрегированной. Таким образом, построение движения системы в части рассматриваемой группы согласуемых фазовых координат сводится к поддержанию соотношений (9) между ними (при соблюдении равенства (10)), а также управлению агрегированной переменной σ_i . При этом полная задача синтеза движения МПС МЛП упрощается до независимого управления

$$M = J + \Psi \quad (12)$$

фазовыми координатами, J из которых составляют первую упомянутую макрогруппу компонентов состояния такой подсистемы (требующих независимого управления ими изначально), а Ψ координат являются агрегированными и определяются соотношениями типа (11). Фактически Ψ – это число групп координат во второй из указанных их макрогруппе, требующих внутригрупповой координации. Поэтому

$$K = G_i \cdot e^i \forall i \in [\overline{1, \Psi}], \quad (13)$$

где $e^i \forall i \in [\overline{1, \Psi}]$ – Ψ -мерный единичный вектор-столбец.

В части, соответствующей второй макрогруппе координат РС МПС МЛП, конструирование высококачественного координированного движения осуществимо путем регулирования агрегированных переменных $\sigma_i \forall i \in [\overline{1, \Psi}]$, а также возникающих при этом ошибок согласования, которые могут быть охарактеризованы матрицей уклонения

$$\delta_{ij} = \{\phi_{ij}(\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Delta_i}])\} \quad \forall i \in [\overline{1, \Psi}], j \in [\overline{1, H_i}]. \quad (14)$$

Соотношения (11) и (14) задают преобразование вектора $\gamma_i^\mu \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Delta_i}]$, характеризующего состояние МПС МЛП в части i -ой группы согласуемых фазовых координат, в агрегированную переменную σ_i , а также вектор уклонения $\delta_{ij} \forall j \in [\overline{1, H_i}]$. Поэтому всегда, за исключением вырожденных случаев, требования к качеству соответствующего координированно-

го движения могут быть исчерпывающе полно и однозначно трансформированы в требования к закону изменения агрегированной переменной и уклонению от него. Таким образом, каждая из подзадач построения движения МПС МЛП в части, соответствующей группе согласуемых каналов, редуцируется до обеспечения требуемого характера агрегированного движения, а также минимального уклонения таких каналов.

Агрегированные переменные $\sigma_i \forall i \in [\overline{1, \Psi}]$, в зависимости от необходимости, могут управляться различным образом. В частности, если каким-либо из составляющих их координат в результирующей динамике МПС МЛП желательно придать конкретные фазовые траектории, то они могут быть достигнуты путём соответствующих изменений агрегированных переменных, в состав которых они входят. Требуемые для этого стратегии $\sigma_i(t) \forall i \in [\overline{1, \Psi}]$ $t \in [t_s, \tau]$ могут быть получены из соотношений типа (11) после подстановки в них выражений $\gamma_i^\mu(t) \forall \mu \in [\overline{\Phi_i, \Delta_i}]$, $i \in [\overline{1, \Psi}]$, $t \in [t_s, \tau]$, являющихся желаемыми законами изменения агрегируемых фазовых координат. При этом на те из них, законы изменений которых не критичны, должны накладываться двусторонние ограничения, вытекающие из условий безопасности движения МЛП, а также иных естественных причин.

Немало особенностей возникает и на стадии создания регулятора МЛП. Предназначенный для построения движения поезда в непредсказуемой обстановке, он должен обеспечивать высокую результативность обработки и использования больших потоков информации. Это возможно лишь при реализации иерархических принципов такого построения [7] за счёт систематизации, структуризации, уровневой градации, детализации и конкретизации, а поэтому – полноты охвата и использования упомянутой информации о состоянии системы на различных уровнях построения её движения. Для каждого из таких уровней становится характерной структурная и функциональная информационная селективность и дифференциация, а поэтому – способность к высококачественной реализации избранного для него круга функций. Эмерджентность такой системы проявляется иерархической синтетичностью функционирования уровней построения движения в его результирующем качестве.

Основными факторами, влияющими на качество движения МЛП, являются: параметры и

структура системы, определяющие её кинематическую и динамическую достаточность для выполнения такого движения; текущая внутренняя и внешняя обстановка, в которой оно реализуется; свойства регулятора системы, в первую очередь – его алгоритма функционирования. Исходя из этого, минимально достаточна трёхуровневая структура упомянутого регулятора: на его низовом уровне – интроконтроллер, реализующий требуемый набор паттерн движений МЛП, а также их устойчивых синергий; на промежуточном уровне – адаптер, приспособляющий движения к обстановке; на верхнем уровне – координатор, исчерпывающе решающий, в синтетическом взаимодействии с блоками предыдущих уровней, двигательную задачу поезда. Функциональная глобальность этих блоков возрастает в инверсном порядке: координатор является ведущим, синтезирующим уровнем регулятора; адаптер – промежуточным, согласующим; интроконтроллер – фоновым, провайдерным.

Основная задача интроконтроллера – «внутрисистемное» управление создаваемым движением, состоящее в исходной инициации его требуемых первичных компонентов, а также их «внутренней» увязке. Это, в свою очередь, предполагает согласованное функционирование исполнительных органов, налаживание их нужных синергий и так далее. Необходимые сведения должны оперативно поступать от датчиков «внутреннего очувствления» системы и составляют первую из информационных макрогрупп регулятора. Для наилучшего соответствия своему предназначению, помимо широкого, точного и оперативного доступа к сведениям, составляющим указанную макрогруппу информационного обеспечения регулятора, интроконтроллер должен обладать как можно более полными наборами представлений мыслимых паттерн движений, а также законов, согласно которым должны изменяться управления этого уровня для реализации таких паттерн. С этой целью в памяти описываемого уровня регулятора целесообразно разместить словарь «движение – управление», выделение которого в виде отдельного блока позволит упростить логическую структуру алгоритма, а также достаточно просто менять и наращивать правила реагирования в процессе обработки.

Синтезируемое движение МЛП, происходя в условиях, в общем случае, непредсказуемо изменяющейся обстановки, должно гарантировано сохранять требуемое качество. Этого возможно достигнуть путём коррекции и коорди-

нации компонентов упомянутого движения, реализуемых интроконтроллером, в зависимости от складывающейся внутренней и внешней его обстановки. Поэтому основным функциональным предназначением промежуточного уровня построения такого движения должно стать придание ему свойства приспособляемости к обстановке, базирующегося на результатах обработки второй информационной макрогруппы регулятора.

При изменении внешней и (или) внутренней обстановки движения, должны приниматься решения относительно стратегии его адаптации, то есть – способа формирования управляющих воздействий на него со стороны адаптационного уровня регулятора (адаптера) в новых условиях. Иными словами, управление должно отслеживать обстановку, которая, как отмечалось, может изменяться непредсказуемо. Поэтому достаточно адекватные алгоритмы синтеза требуемых законов управления могут быть построены лишь с использованием дифференциально-игровых методов [5], концептуально гарантирующих качество адаптации,

Адаптационный уровень регулятора (аналогично предыдущему) может иметь в своем составе словарь «обстановка – управление». Для этого, помимо блока опознания обстановки, обладающего богатым набором параметризованных ожидаемых обстановок движения, на этом уровне его построения должен иметься поисковый модуль, эффективно реализующий отображение множества классов обстановки во множество управлений адаптационного уровня построения движения.

Итогом реализации движения поезда должно явиться исчерпывающее решение стоящих перед ним задач. Однако описанные уровни построения указанного движения (ни порознь, ни в совокупности) не имеют возможности такое решение обеспечить. Это – предназначение верхнего уровня регулятора (координатора). Обработывая информацию третьей макрогруппы, и, следовательно, исходя из глобальных целей конструируемого движения, этот уровень его построения должен, прежде всего, определять алгоритм достижения таких целей, то есть осуществлять отображение множества целей, вытекающих из решаемых двигательных задач, во множество алгоритмов их решения. Такое отображение может достаточно целесообразно реализовываться соответствующим поисковым модулем после размещения в памяти координационного уровня регулятора словаря «задача – алгоритм».

Двигательные задачи, подлежащие решению (с их детализацией до преследуемых целей), должны ставиться перед системой извне (например, с помощью модуля-задатчика) и корректироваться с учетом складывающейся обстановки (которая оценивается адаптером). Вслед за выявлением общего алгоритма такого решения, должен определяться двигательный состав задачи (то есть – минимально достаточный набор паттерн движений), инициироваться запросы на их реализацию (под непосредственным управлением интроконтроллера во взаимодействии с адаптером), а также осуществляться тщательный контроль и корректировка этой реализации. В результате осуществления этого блока операций, синтезируются управления МЛП. Таким образом, в любой момент как информационные потоки координатора (между ним, с одной стороны, и адаптером, задатчиком, а также интроконтроллером – с другой), так и обслуживающие его функционирование фоновые паттерны движений должны быть релевантны решаемой ими (в совокупности) задаче. В то же время, функциональная организация такого решения всегда должна предшествовать его двигательной организации.

Итак, результирующее движение системы строится в процессе синтетического взаимодействия трех описанных уровней регулятора. Ведущая роль в таком построении всегда принадлежит верхнему уровню, который, с помощью синтезируемых им управлений, координирует работу двух нижележащих уровней так, чтобы упомянутое результирующее движение всегда оставалось целенаправленным (то есть, решало поставленные перед ним задачи). Базис того же построения составляют паттерны движений, а также их устойчивые синергии, конструируемые нижним уровнем регулятора (с учетом всех «внутренних» особенностей системы) под воздействием его управлений. Наконец, адаптация движения к обстановке осуществляется под воздействием управлений, синтези-

руемых промежуточным уровнем регулятора. Тот же уровень корректирует подлежащие решению двигательные задачи исходя из результатов оценки обстановки.

Реализация разработанной методики построения движения МЛП в непредсказуемой обстановке, в конечном итоге, ведёт к преодолению избыточных степеней свободы системы путём координации её движений. Это, в свою очередь, как показано, позволяет существенно повысить управляемость артефакта и, как следствие, – качество его движения без затраты на это чрезмерных обобщённых ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берёзкин, Е. Н. Курс теоретической механики [Текст] / Е. Н. Берёзкин. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 645 с.
2. Управление движением механических систем [Текст] / Е. Я. Смирнов [и др.]. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. – 316 с.
3. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией [Текст] / В. А. Дзензерский [и др.]. – К.: Наук. думка, 2001. – 479 с.
4. Алгоритмы управления движением шагающего аппарата: препринт № 63 [Текст] / Д. Е. Охотимский [и др.]. – М.: ИПМ АН СССР, 1972. – 38 с.
5. Красовский, Н. Н. Управление динамической системой. Задача о минимуме гарантированного результата [Текст] / Н. Н. Красовский. – М.: Наука, 1985. – 520 с.
6. Бортовые терминальные системы управления: Принципы построения и элементы теории [Текст] / Б. Н. Петров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
7. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем [Текст] / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – М.: Мир, 1973. – 332 с.

Поступила в редколлегию 19.04.2011.

Принята к печати 21.04.2011.