

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

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Запропоновано методику ієрархічної побудови руху магнітолевітуючого поїзда. Обґрунтовані її переваги й доцільність трирівневого регулятора системи. Побудовано глобальний алгоритм його функціонування.

Предложена методика иерархического построения движения магнитолевитирующего поезда. Обоснованы её преимущества и целесообразность трёхуровневого регулятора системы. Построен глобальный алгоритм его функционирования.

The technique of hierarchic construction of magnetic levitated train motion is offered. Its advantages and expediency of three-leveled system regulator were grounded. The global algorithm of its work is constructed.

Транспортная система с магнитолевитирующими поездами (ТС МЛП) создана для перемещения пассажиров и грузов. Такое перемещение – её (ТС МЛП) основная функция. Являясь сложным артефактом, эта система включает различные подсистемы. Их функционирование базируется на всевозможных физических, химических, а также иного рода естественных принципах и эффектах. Однако, исходя из отмеченной основной функции ТС МЛП, качество механического движения МЛП в итоге однозначно определяет потребительскую ценность системы в целом.

Современный этап развития социума характеризуется экспоненциальным нарастанием его (развития) интенсивности. Непосредственное отношение это имеет, в частности, к обслуживающим ТС. В связи с этим, исключительно когнитивный уровень исследований их функционирования является недостаточным. Поэтому парадигма таких исследований неизбежно должна быть сдвинута для достижения их максимальной креативности. В случае ТС МЛП это означает, в частности, необходимость построения, в качестве конечной цели изучения таких систем, требуемого качества движений МЛП.

Естественные (т.е. происходящие под воздействием только неуправляемых – естественных – возмущений) движения МЛП, могут быть описаны моделью [1]:

$$\begin{aligned} a_{\lambda\mu} \cdot \eta^\mu &= E_\lambda; \\ a_{\lambda\mu} &= c_{\lambda\mu} \cdot p^{(2)} + (C_{\lambda,\mu\nu} \cdot \eta^\nu + \beta_{\lambda\mu}) \cdot p + l_{\lambda\mu}; \\ p &= \frac{d}{dt} \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}], \end{aligned} \quad (1)$$

где $\eta^\mu \forall \mu \in [\overline{1, L}]$, L – обобщённые координаты расчётной схемы МЛП, а также число таких координат; $c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu} \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}]$ – ковариантный метрический тензор упомянутого агрегата, а также его трёхиндексный символ Кристоффеля 1-го рода; $\beta_{\lambda\mu}, l_{\lambda\mu} \forall \lambda, \mu \in [\overline{1, L}]$ – диссипативные и квазиупругие коэффициенты приведённой модели; $E_\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$ – внешние возмущения системы.

Естественные движения, как правило, не обладают требуемыми свойствами. Для придания им (движениям) таких свойств моделирующие уравнения должны быть изменены так, чтобы они стали совместны с описывающими эти свойства целевыми соотношениями, связывающими компоненты состояния системы [2]. Например, к МЛП могут быть приложены управляющие воздействия $\Pi_\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$. Если упомянутая совместность достигается, то описываемая целевыми соотношениями поверхность становится аттрактором изображающей точки системы, а её движение гарантированно обладает желаемыми свойствами. Процесс перехода от естественного к управляемому движению будем называть его построением.

Обычно механическая система, которая может быть принята в качестве адекватной расчётной схемы механической подсистемы МЛП, является большой, существенно нелинейной и сложной [3]. Помимо того, за редким исключением такая система является многосвязной, а её движение происходит в непредсказуемой внешней и внутренней обстановке. В подобных случаях, как известно [4], основными трудно-

стями, осложняющими построение движений реальных технических систем, являются: обилие их (подлежащих управлению) степеней свободы, конечная жесткость звеньев кинематических цепей, а также требование (в подавляющем большинстве случаев) слитной, непрерывной, взаимоувязанной реализации фаз таких движений в виде их целесообразных синергий.

Использование одноуровневых регуляторов для построения движений описанного типа систем обычно ведёт к неудовлетворительному качеству таких движений [5]. Возникающая коллизия может быть устранена при их иерархическом построении, значительно повышающем эффективность связанной с ним переработки и использования больших массивов информации [6], а поэтому – и результирующее качество управляемого движения. Достигается это, в том числе, за счёт систематизации, структуризации, уровневой градации, детализации и конкретизации, а поэтому – полноты охвата и использования упомянутой информации о состоянии системы на различных уровнях управления им. 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.

Результаты анализа задачи построения движения МЛП свидетельствуют о том, что основными факторами, влияющими на его (движения) качество, являются: свойства системы, определяющие её достаточность (кинематическую и динамическую) для выполнения такого движения; текущая внутренняя и внешняя обстановка, в которой оно реализуется; особенности регулятора системы, в первую очередь – его алгоритма функционирования.

Исходя из отмеченного, 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: коор-

динатор является ведущим, синтезирующим уровнем регулятора; адаптер – промежуточным, согласующим; интроконтроллер – фоновым, провайдерным.

Основной задачей интроконтроллера является «внутрисистемное» управление создаваемым движением, предусматривающее исходную инициацию его требуемых первичных компонентов, а также их «внутреннюю» увязку. Это, в свою очередь, требует согласованного функционирования исполнительных органов, налаживания их нужных синергий и т.д. Необходимые сведения должны оперативно получаться от датчиков «внутреннего очувствления» системы и составляют первую из информационных макрогрупп регулятора. Упомянутое же «внутрисистемное» управление движением может строиться, например, исходя из следующих соображений.

Если программные соотношения аттрактора изображающей точки системы полны, то из них, в явном виде, может быть получен закон:

$$\eta^\lambda = \eta^\lambda(t) \quad \forall \lambda \in \overline{[1, L]}, \quad (2)$$

где t – текущее время, являющийся конструктивным представлением движения, обладающего желаемыми свойствами. Для реализации такого движения, как отмечалось, к МЛП, в частности, могут быть приложены управляющие воздействия $\Pi_\lambda \quad \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$. Поскольку в данном случае речь идет о «внутрисистемном» управлении полезным движением МЛП, синтезируемом на нижнем уровне иерархии регулятора, то (для этого случая) в уравнениях (1) следует принять $E_\lambda = 0 \quad \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$ и, помимо того, дополнить их правые части членами $\Pi_{l\lambda} \quad \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$, являющимися базовыми компонентами величин $\Pi_\lambda \quad \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$, реализуемыми в «чистом» виде лишь для синтеза исходных паттерн движений. После этого, из преобразованной указанным способом модели (1), могут быть найдены законы, согласно которым должны изменяться управления этого нижнего уровня:

$$\begin{aligned} \Pi_{l\lambda}(t) = & c_{\lambda\mu}(t) \cdot \ddot{\eta}^\mu(t) + \\ & + [C_{\lambda,\mu\nu}(t) \cdot \dot{\eta}^\nu(t) + \beta_{\lambda\mu}(t)] \cdot \dot{\eta}^\mu(t) + \\ & + l_{\lambda\mu}(t) \cdot \eta^\mu(t) \quad \forall \lambda, \mu, \nu \in \overline{[1, L]}, \quad (3) \end{aligned}$$

чтобы «внутрисистемное» (т.е. извне невозмущенное) движение описывалось требуемыми равенствами (2).

Итак, рассмотренный нижний уровень построения движения (интроконтроллер) для наилучшего соответствия своему предназначению (помимо широкого, точного и оперативного доступа к сведениям, составляющим первую макрогруппу информационного обеспечения регулятора) должен обладать как можно более полным набором законов типа (2) и (3), а также, безусловно, развитым поисковым модулем, позволяющим эффективно осуществлять отображение вида

$$R: H \rightarrow P_l; H = \{\eta^\lambda(\bullet) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}\};$$

$$P_l = \{\Pi_{m\lambda}(\bullet) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}\}, \quad (4)$$

где H, P_l – множества законов желаемых, извне невозмущенных движений системы, а также управлений нижнего уровня, необходимых для реализации этих движений; R – оператор отображения, действующий из H в P_l . Здесь и далее любая функция с точкой на месте аргумента подразумевает совокупность её (функции) значений при всех допустимых значениях такого аргумента.

Одной из целесообразных форм организации указанного отображения может быть размещение в памяти описываемого уровня регулятора словаря «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 системы, происходя в условиях, в общем случае, непредсказуемо изменяющейся обстановки, должно оставаться целенаправленным. Одним из наиболее эффективных способов преодоления этого затруднения является коррекция и координация компонентов упомянутого движения (реализуемых интроконтроллером), требующая, в свою очередь, оперативного слежения за внутренней и внешней обстановкой движения. Поэтому основным функциональным предназначением промежуточного уровня построения такого движения должно стать придание ему свойства приспособляемости к упомянутой обстановке, базирующегося на результатах обработки второй информационной макрогруппы и требующего, прежде всего, классификации этой обстановки. Для двигательной адаптации

достаточной, очевидно, является классификация обстановки по принципу дихотомии (в виде следующих один за другим уровней классов), за которой должна последовать ее параметризация. Последнее означает, что каждому выделенному классу обстановки в однозначное соответствие должны быть поставлены множества существенных для движения, доступных для наблюдения и однозначно идентифицирующих такой класс обстановки параметров. При решении различных двигательных задач классификация (и, как следствие, параметризация) одной и той же обстановки может существенно различаться.

При переходе внешней и (или) внутренней обстановки движения из класса в класс должно приниматься решение относительно стратегии адаптации этого движения, то есть – способа формирования управляющих воздействий на него $\Pi_{m\lambda}(t) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$ со стороны адаптационного уровня регулятора (адаптера) в новых условиях. Как и обстановка, решения должны быть параметризованы. После этого, должны быть установлены зависимости типа:

$$\alpha_d = \alpha_d(v_c, t), \quad (5)$$

где v_c, α_d – параметры обстановки и решения. Иными словами, решения должны отслеживать обстановку. Тогда текущая структура взаимодействия функциональных модулей рассматриваемого уровня регулятора в процессе построения движения может определяться блоком классификации обстановки в зависимости от реализовавшегося ее класса и, в каждой конкретной ситуации, являться отображением (вообще говоря, неоднозначным) структуры обстановки, например, – согласно соотношениям

$$\aleph: \Gamma \rightarrow S, \quad (6)$$

где Γ и S – множества классов обстановки и структур адаптера; \aleph – оператор (неоднозначный) отображения, действующий из Γ в S .

Обстановка движения, как отмечалось, может изменяться непредсказуемо. Поэтому достаточно адекватные алгоритмы синтеза требуемых законов $\Pi_{m\lambda}(t) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$ могут быть построены лишь с использованием дифференциально-игровых методов [7], концептуально гарантирующих качество адаптации, которое при этом оценивается значением I интегрального (многокритериально характеризующего упомянутое качество адаптации) функционала Λ . Тогда указанные законы могут быть определены из равенств типа:

$$I = \inf_{P_m} \sup_W \Lambda \langle \Pi_{m\lambda}(t), E_\lambda(t) \rangle$$

$$P_m = \{\Pi_{m\lambda}(\bullet)\}, W = \{E_\lambda(\bullet)\}$$

$$\forall \lambda \in \overline{[1, L]}, t \in [t_s, \tau], \quad (7)$$

где P_m, W – множества управлений адаптационного уровня построения движения, а также его возмущений; Λ – принятый для оценки функционал; $[t_s, \tau]$ – интервал построения движения МЛП.

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

$$N: \Gamma \rightarrow P_m, \quad (8)$$

где N – оператор отображения, действующий из Γ в P_m .

Итогом реализации движения системы 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, т.е. осуществлять отображение вида:

$$Q: A \rightarrow \Xi, \quad (9)$$

где A, Ξ – множества целей, вытекающих из решаемых двигательных задач, а также алгоритмов их решения; Q – оператор отображения (в общем случае – неоднозначного), действующий из A в Ξ . Аналогично отображениям (4) и (8), соотношение (9) достаточно целесообразно может 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 об-

становки (которая оценивается адаптером). Поэтому конкретизация, как элемента множества A , так и вида оператора Q в каждом случае должна осуществляться с учетом обоих этих факторов. Алгоритмы же, являющиеся элементами множества Ξ , в подавляющем большинстве случаев могут иметь цепное строение в том смысле, что каждый из них может предполагать последовательную реализацию ряда более или менее разнообразных паттерн движений, связанных между собой смыслом решаемой двигательной задачи и (в результате этой реализации) закономерно приводящих к ее исчерпывающему решению. Поэтому, вслед за выявлением общего алгоритма такого решения, должен определяться двигательный состав задачи (т.е. – минимально достаточный набор упомянутых паттерн движений), инициироваться запросы на их реализацию (под непосредственным управлением интроконтроллера во взаимодействии с адаптером), а также осуществляться тщательный контроль и корректировка (например, – с использованием алгоритма аркана [2]) этой реализации. В результате осуществления этого блока операций синтезируются управления $\Pi_{i\lambda}(t) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$. 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 $\Pi_{i\lambda}(t) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$, координирует работу двух ниже лежащих уровней так, чтобы упомянутое результирующее движение всегда оставалось целенаправленным (т.е., 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 управления) под воздействием управлений $\Pi_{i\lambda}(t) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$. Наконец, адаптация движения к внешней обстановке осуществляется под воздействием

управлений $\Pi_{m\lambda}(t) \forall \lambda \in \overline{[1, L]}$, синтезируемых промежуточным уровнем регулятора. Тот же уровень корректирует подлежащие решению двигательные задачи исходя из результатов оценки обстановки.

В возможности точной, адекватной и эвристичной декомпозиции задачи построения движения МЛП на ряд более простых подзадач (многие из которых в значительной части могут быть решены заблаговременно, в стационарных условиях – на стадии проектирования регулятора) и, благодаря этому, существенного повышения качества такого движения (за счет реализации возникающей возможности более точного решения упомянутых подзадач), достигаемого без использования сложных алгоритмов управления им, заключаются основные преимущества предлагаемой методики упомянутого построения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков, В. А. Тензорное моделирование движения магнитолевитирующего поезда относительно пути [Текст] / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Вестн. ХНТУ – 2007. – № 2 (28). – С. 265-270.

2. Коренев, Г. В. Очерки механики целенаправленного движения [Текст] / Г. В. Коренев. – М.: Наука, 1980. – 192 с.
3. Дзензерский, В. А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах [Текст] : метод. рекомендации / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко. – Д.: Арт-Прогресс, 2003. – 232 с.
4. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата [Текст] / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
5. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем [Текст] / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 332 с.
6. Мангейм, М. Л. Иерархические структуры [Текст] / М. Л. Мангейм. – М.: Мир, 1970. – 180 с.
7. Красовский, Н. Н. Управление динамической системой. Задача о минимуме гарантированного результата [Текст] / Н. Н. Красовский. – М., 1985. – 520 с.

Поступила в редколлегию 20.05.2009.

Принята к печати 04.06.2009.