

УДК 629.439

КРЕАТИВНАЯ ПАРАДИГМА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М.

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск

Разработана методика исследования динамики магнитолевитирующего поезда, индуцированная креативной парадигмой такого исследования, предусматривающей решение обратной задачи динамики. Методика ориентирована на обеспечение возможности достижения максимально высокого уровня качества результирующего движения системы, а также его приспособляемости к окружающей обстановке. Благодаря этому, она позволяет существенно облегчать процесс и усовершенствовать результат синтеза желательной управляемой динамики рассматриваемого поезда, требуя для этого затраты лишь умеренных обобщенных ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитолевитирующий поезд, динамика, обратная задача.

КРЕАТИВНА ПАРАДИГМА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОТЯГУ

Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М.

Розроблено методику дослідження динаміки магнітолевітуючого потягу, яка індукована креативною парадигмою такого дослідження, що передбачає рішення оберненої задачі динаміки. Методика орієнтована на забезпечення можливості досягнення максимально високого рівня якості результируючого руху системи, а також його пристосовності до навколишнього оточення. Завдяки цьому, вона дозволяє істотно полегшувати процес і удосконалювати результат синтезу бажаної керованої динаміки розглянутого потягу, вимагаючи для цього витрати лише помірних узагальнених ресурсів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: магнітолевітуючий потяг, динаміка, обернена задача.

CREATIVE PARADYGM FOR STUDY THE DYNAMICS OF MAGNETIC LEVITATING TRAIN

Polyakov V.A., Khachapuridze N.M.

The technique of magnetic levitated train's dynamics research is developed. It is induced by a creative paradigm of the research and provides the decision of a return problem of dynamics. The technique is orientated on achievement of as high as possible degrees of system's motion quality and also – of its adaptation to environmental conditions. It allows essential simplification of the process and improvement of the result of the train's dynamics construction. The expenses of only moderate generalized resources are required for this purpose.

KEY WORDS: magnetic levitated train, dynamics, inverse problem.

Магнитолевитирующие поезда (МЛП) являются весьма дорогостоящими, уникальными артефактами. Они эксплуатируются с экстремальными, для наземного транспорта, скоростями. Проблема обеспечения высокого качества их движения приоритетна среди всех, связанных с их созданием. Натурный эксперимент над ними дорог, опасен, а часто и вовсе невозможен. Обычные теоретические методы исследования протекающих в них процессов также мало эффективны. Поэтому возможно большая часть таких исследований должна выполняться методами математического моделирования, сочетающими многие

достоинства теоретических и экспериментальных методов [1].

Приоритет проблемы качества динамики МЛП требует, при её решении, как повышения полноты, адекватности и системности отражения в математических моделях структурно-параметрических особенностей поезда, так и всемерного расширения спектра функциональных возможностей этих моделей. В то же время, дальнейшее наращивание, при традиционной реализации – решении прямой задачи динамики системы, их размерностей и сложности ведёт к лавинообразному росту объёма и быстрому падению точности информационных преобразований моделирования.

Предназначением МЛП является перемещение пассажиров и грузов. Поэтому гиперцелью исследования его динамики, определяющей парадигму этого исследования, должно быть построение движения, обладающего требуемыми свойствами. Обычно же, как правило, исследования упомянутой динамики [2, 3] предусматривают лишь описание и анализ, но не синтез движений поезда и, поэтому, принципиально не могут гарантировать достижение их требуемого качества. В то же время, при осуществлении воздействий на поезд, найденных из модели движения в результате решения обратной задачи его динамики, упомянутое качество может быть гарантировано [4], а очерченная коллизия “проклятия размерности” — радикально устранена. В этом случае, исследование обретает креативный, эвристический характер, не присущий традиционному пути проведения. Использование его результатов позволяет придать МЛП весьма важное свойство грубости, а реализация модели движения становится возможной непосредственно в процессе управления им — на бортовых компьютерах [5]. Наконец, если тот же способ исследования сочетать с принципом управления поездом по обобщённым ускорениям, то результирующее движение легче адаптировать к обстановке [6]. По отношению к столь сложным, большим и разнородным по физической природе элементам системам, какими являются МЛП, это тем более актуально, особенно — с учётом свойства эмерджентности таких систем [7].

Исходя из изложенного, целью настоящей работы является разработка методики построения движения МЛП, свободной от упомянутых несовершенств (неизбежных для традиционного пути его исследования). Методика должна быть ориентирована на обеспечение возможности достижения максимально высокого (исходя из применяемых критериев оценки) уровня качества результирующего движения системы, а также его приспособляемости к окружающей обстановке и, благодаря этому, позволять существенно облегчать процесс и усовершенствовать результат синтеза желательной управляемой динамики рассматриваемого поезда.

Выполнение требуемых движений поезда в целом должно обеспечиваться во взаимодействии всех его подсистем. Среди них — механическая (МП), электромагнитная (ЭМП), аэродинамическая (АДП), термодинамическая (ТДП) и многие иные. Основными из них являются первые две. Но на качество реального движения МП МЛП, являющееся определяющим критерием при глобальной оценке результирующей эффективности рассматриваемой транспортной технологии, влияние, в определённой степени, оказывает функционирование всех слагающих её компонентов.

Построение движения поезда, понимаемое как переход от его естественной динамики к управляемой, наиболее целесообразно основывать

на модели не принуждённого движения. После выбора расчётной схемы МЛП, конгруэнтной решаемой для него задаче, такая модель может быть построена множеством методов. Однако, для получения уравнений, адекватно отражающих протекающие в системе процессы, эти методы требуют различных затрат обобщённых ресурсов. Кроме того, модели, получаемые различными путями, существенно разнятся удобством и универсальностью их дальнейшего использования. Как по критерию минимизации упомянутых ресурсов, так и с позиций универсальности и удобства использования результирующих моделей динамики МЛП, а также ряда иных, наиболее предпочтительным представляется тензорный путь их получения [8].

Модель естественного движения МП МЛП в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$, удобных для описания этого движения относительно направляющего его пути, может быть записана в виде [9]

$$c_{\lambda\mu} \cdot \ddot{\eta}^\mu + C_{\lambda,\mu\nu} \cdot \dot{\eta}^\mu \cdot \dot{\eta}^\nu = Y_\lambda \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}], \quad (1)$$

где $c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu}, Y_\lambda \forall \lambda, \mu, \nu \in [\overline{1, L}]$ — ковариантный метрический тензор агрегата, являющегося расчётной схемой указанной подсистемы, его трёхиндексный символ Кристоффеля 1-го рода в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$, а также обобщённые силы, им соответствующие;

L — число степеней свободы МП МЛП.

В эксплуатационных условиях на текущие значения $Y_\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, L}]$, а поэтому — на результирующие движения МП поезда, влияние оказывают, в той, или иной степени, все иные компоненты МЛП как единой системы. Поэтому, в дополнение к модели (1) естественного движения МП, должно быть описано функционирование иных, значимых для этого механического движения, компонентов поезда. В первую очередь это относится к его ЭМП.

Смысл функционирования ЭМП — дозированный отбор энергии из питающей электрической сети, а также её преобразование в энергию парциальных движений МП поезда. Основными функциональными элементами упомянутой ЭМП являются тяговый, левитационный, а также боковой стабилизации. Мера их взаимодействия с МП каждого j -го экипажа МЛП — соответственно, тяговое F_{Tj} , левитационное F_{Lj} и, стабилизирующее его поперечные колебания, направляющее F_{Gj} усилия, а также усилие его электродинамического торможения F_{Dj} . Мгновенные значения указанных усилий могут быть определены согласно выражениям [1]:

$$f_{Tj} = \sum_{v=1}^K i_s^v \cdot \sum_{\kappa=1}^{N_{ac}} i_{ac}^\kappa \cdot \frac{\partial \mu_{v\kappa}}{\partial \xi}; \quad (2)$$

$$f_{Lj} = \sum_{v=1}^K i_s^v \cdot \sum_{\lambda=\chi_v-E}^{\chi_v+E} i_{wc}^\lambda \cdot \frac{\partial m_{v\lambda}}{\partial \zeta}; \quad (3)$$

$$f_{Gj} = \sum_{v=1}^K i_s^v \cdot \sum_{\lambda=\chi_v-E}^{\chi_v+E} i_{wc}^\lambda \cdot \frac{\partial m_{v\lambda}}{\partial \eta}; \quad (4)$$

$$f_{Dj} = \sum_{v=1}^K i_s^v \cdot \sum_{\lambda=\chi_v-E}^{\chi_v+E} i_{wc}^\lambda \cdot \frac{\partial m_{v\lambda}}{\partial \xi}. \quad (5)$$

В этих выражениях введены следующие обозначения:

- i_s^v, K – мгновенное значение тока в цепи v -ого сверхпроводящего экипажного контура (СЭК), а также число таких контуров, установленных на экипаже;
- $i_{ac}^\kappa, i_{wc}^\lambda$ – текущие значения токов в цепях κ -ой якорной катушки линейного синхронного двигателя (ЛСД) и λ -го короткозамкнутого путевого контура (КПК);
- N_{ac} – число катушек якорной обмотки ЛСД, взаимодействие с которыми ежесекундно учитывается для каждого СЭК;
- χ_v – порядковый номер (считая от начала участка трассы, вдоль которого происходит движение МЛП, с учётом направления этого движения) последнего КПК, поперечную осевую линию которого миновала поперечная осевая линия v -го СЭК;
- E – половина числа КПК, с которыми, при любом текущем положении СЭК, учитывается его электромагнитное взаимодействие;
- $\mu_{v\kappa}, m_{v\lambda}$ – взаимные индуктивности между магнитной цепью v -го СЭК, а также соответственно цепями κ -ой якорной катушки и λ -го КПК;
- $Q_\xi^\zeta \eta^\zeta$ – путевой триэдр рассматриваемого экипажа МЛП.

Токи $i_s^v \forall v \in [1, K]$, с достаточной для практических целей точностью, могут считаться имеющими постоянные значения. Мгновенные же значения токов

$i_{wc}^\lambda \forall \lambda \in [(\chi_v - E), (\chi_v + E)], v \in [1, K]$ и $i_{ac}^\kappa \forall \zeta = \xi + 3 \cdot \sigma, \xi \in [1, 3], \sigma \in [1, (K_s - 1)]$ (где K_s – число триад якорных катушек, включённых в

секцию статора ЛСД), а также величин $\frac{\partial \mu_{v\kappa}}{\partial \xi}$,

$\frac{\partial m_{v\lambda}}{\partial \zeta}, \frac{\partial m_{v\lambda}}{\partial \eta}, \frac{\partial m_{v\lambda}}{\partial \xi} \forall v \in [1, K], \kappa \in [1, N_{ac}]$

и $\lambda \in [(\chi_v - E), (\chi_v + E)]$ определяются динамическим взаимодействием МП и ЭМП МЛП.

Традиционное исследование движения МЛП предполагает численное интегрирование описывающих это движение дифференциальных уравнений. При этом интегрированию, в общем случае, подлежит совокупность уравнений, описывающих динамику всех компонентов поезда, или, по крайней мере, – наиболее значимых из них. Последними, как указано, являются МП и ЭМП. Но и их динамика, как следует из изложенного, описывается системами существенно нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, число которых (при исследовании реальных движений МЛП) может исчисляться десятками и даже сотнями. Конечные же выражения для определения значений элементов таких уравнений обычно являются весьма громоздкими. При этом решение прямой задачи динамики поезда предполагает, как правило, предварительное разрешение подлежащих интегрированию уравнений относительно старших производных. А это, в свою очередь, требует обращения матриц высокой размерности. Если учитывается параметрическая, и (или) структурная нестационарность исследуемой системы, то такое обращение должно производиться на каждом шаге интегрирования. В случае если реализация модели предполагается непосредственно в процессе движения МЛП (то есть должна носить прогнозирующий, многовариантный характер), то осуществление такой реализации становится вовсе не реальным. Но даже в случае, если использование построенной модели предполагается для поверочных расчётов в стационарных (не “бортовых”) условиях, а система, принимаемая в качестве расчётной схемы МЛП, предполагается полностью стационарной, осуществление традиционного пути исследования его движения сопряжено с большими, ни чем не оправданными временными, финансовыми и иными затратами. При этом, как отмечалось, лавинообразно растёт объём и катастрофически быстро падает точность информационных преобразований моделирования. Ситуация ещё более усугубляется тем обстоятельством, что результат решения прямой задачи динамики системы носит предсказательно-констатирующий, некреативный характер и принципиально не может гарантировать достижение требуемого качества исследуемого движения.

Исследование движения МЛП может быть радикально рационализировано сдвигом его парадигмы в сторону решения обратной задачи динамики системы. Детализация постановки этой задачи, в каждом случае, зависит, в частности, от конкретных особенностей условий её решения, а также качеств, которые желательно придать реальному движению поезда. Однако, глобальный стратегический смысл указанной задачи заключается, как известно [6, 10, 11], в следующем. Движение

поезда под действием его естественных возмущений, описываемое соответствующими уравнениями, в подавляющем большинстве случаев не обладает желательными свойствами. В свою очередь, эти свойства определяют качество указанных движений и могут быть каким-либо удобным образом описаны, благодаря чему, – становятся доступными для использования. Чтобы реальное движение МЛП обладало упомянутыми свойствами, следует любым способом, не противоречащим объективным физическим законам, изменить моделирующие это движение уравнения так, чтобы они были совместны с описанием желательных свойств. Способ преобразования модели принципиально не ограничен и определяется, в основном, удобством натурной реализации влекомых им изменений исследуемой системы или (и) воздействий на неё. На практике, однако, наиболее распространённым является введение в модель движения аддитивных управляющих воздействий на систему. Алгоритмы их необходимых изменений получаемы из решения обратной задачи динамики системы после определения желаемых движений МЛП.

Исполнительным органом, реализующим управляющее воздействие, например, на продольное движение МП МЛП, является, как отмечалось, ЛСД. Чтобы указанное парциальное движение происходило желательным образом, параметры двигателя и их соотношения должны принадлежать некоторым рациональным диапазонам, а его фазовая якорная обмотка – питаться напряжением, характеристики которого следует (совместно, взаимосвязано) изменять согласно определённым законам. Упомянутые диапазоны и законы гарантированно определимы, в процессе решения обратной задачи динамики рассматриваемой электромеханической подсистемы поезда, исходя из желаемых законов его продольного движения, с использованием соответствующего компонента системы (1), а также уравнений, описывающих динамику электромагнитных процессов ЛСД и его взаимодействия с МП поезда.

Как и всегда, при решении обратных задач динамики систем, для определения указанных законов и диапазонов параметров требуются лишь операции формальной логики и алгебры матриц. Благодаря этому, ресурсоёмкость предлагаемой методики исследования движения МЛП, по сравнению с традиционным вариантом такого исследования, радикально снижается.

Практически все компоненты управляющих воздействий на поезд неизбежно реализуются с ошибками, порождая движения, отличные от желательных. Поэтому, в дополнение к программным составляющим управляющих компонентов, должны находиться корректирующие принуждения системы, “закрывающие” управление МЛП путём гашения

ошибок его движения по сравнению с желаемым. Полное же управление поездом строится по принципу дискретной позиционной коррекции его текущего состояния относительно континуально стабилизируемой программной траектории изображающей точки. Это позволяет ориентировать регулятор на стабилизацию задаваемых сигналов в условиях воздействия возмущений. Последняя же задача – значительно более проста, чем синтез непрерывного позиционного управления движением непосредственно в его процессе.

Для синтеза как программных, так и корректирующих составляющих компонентов принуждений поезда принципиально возможным является использование различных представлений его желательных и фактически реализуемых движений [5]. В то же время, при наличии такой возможности, целесообразным является [4] использование в алгоритмах синтеза обобщённых ускорений системы. В этом случае, как отмечалось, она приобретает свойства, способствующие адаптации движения к обстановке.

Приведенная схема решения обратной задачи динамики МЛП свидетельствует о том, что, основанная на этом решении парадигма исследования движения, освобождает индуцируемую ею методику от несовершенств, неизбежных при использовании традиционного способа такого исследования. Эта методика несравненно более ресурсно-экономична, креативна и эвристична, позволяя гарантировать требуемое качество движения поезда, а также весьма важное свойство его грубости. При этом реализация модели становится возможной непосредственно в процессе управления движением МЛП – на бортовых компьютерах. Кроме того, если в основу замыкания синтезированного управления будет положен принцип отработки обобщённых ускорений системы, то она автоматически обретает свойства, способствующие адаптивности движения к обстановке.

Разработка методики построения движения МЛП доведена до компьютерных алгоритмов. Её использование будет способствовать существенному облегчению процесса синтеза желательной управляемой динамики рассматриваемого поезда, а также повышению её качества, требуя для этого затраты лишь умеренных обобщённых ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзензерский В.А., Омельяненко В.И., Васильев С.В., Матин В.И., Сергеев С.А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. К.: Наук. Думка. – 2001. – 479 с.
2. Дзензерский В.А., Зевин А.А., Радченко Н.А., Хачапуридзе Н.М. Некоторые вопросы математического моделирования левитацион-

- ного движения электродинамических транспортных средств *Математическое моделирование в образовании, науке и промышленности: Сб. науч. трудов.* СПб.: Санкт-Петербургское отделение МАН ВШ. – 2000. – С. 73 – 78.
3. Радченко Н. А., Кузнецова Т. И. Динамика сцепов трёх сочленённых электродинамических экипажей *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізничн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна.* Вып. 15. Днепропетровск. – 2007. — С. 170 – 174.
4. Крутько П. Д. *Обратные задачи динамики управляемых систем: Нелинейные модели.* – М.: Наука. – 1988. – 328 с.
5. Воробьев Л. М. *К теории полёта реактивных аппаратов.* – М.: Машиностроение. – 1979. – 375 с.
6. Галиуллин А. С. *Аналитическая динамика.* – М.: Высш. шк. – 1989. – 264 с.
7. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. *Введение в системный анализ.* М.: Высш. шк. – 1989 – 320 с.
8. Лурье А.И. *Аналитическая механика.* М.: Гостехиздат. – 1961. – 824 с.
9. Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М. Моделирование относительного движения магнитолевитирующего поезда *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізничн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна.* Вип.14 Дніпропетровськ, 2007. — С. 146 – 152.
10. Баркер Дж. *Парадигмы мышления: Как увидеть новое и преуспеть в изменяющемся мире.* М.: Альпина Бизнес Букс. – 2007. – 192 с.
11. Корнев Г.В. *Основы механики целенаправленного движения.* М.: Наука. – 1980. – 192 с.