

УДК 629.439.

ДИНАМИКА МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА – ОСНОВА ЕГО ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ

Поляков В.А., Хачануридзе Н.М.,

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, г. Днепрпетровск

Обоснованы рациональные пути повышения качества движения механической подсистемы магнитолевитирующего поезда, как основы его потребительской ценности. Проанализированы внешние и внутренние факторы, влияющие на это качество. Разработаны пути улучшения такого влияния. Прогнозирована значимость разработанной методики построения высококачественного движения поезда.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд, механическая подсистема, расчетная модель.

Актуальность и постановка проблемы. Являясь одним из видов наземного транспорта, магнитолевитирующий поезд (МЛП) предназначен для перемещения пассажиров и грузов. Такое перемещение – его основная функция. Будучи сложным артефактом, МЛП включает различные подсистемы. Их функционирование базируется на всевозможных физических, химических, а также иного рода естественных принципах и эффектах. Однако, исходя из отмеченной основной функции МЛП, качество его механического движения, в итоге, однозначно определяет потребительскую ценность системы в целом.

Обстановка движения [1] поезда сложна и непредсказуема. Вопреки этому, само движение должно оставаться целенаправленным [2], то есть гарантированно решающим двигательные задачи (ДЗ) поезда. Интенсификация перевозочного процесса ещё более обостряет внутреннюю и внешнюю обстановку такого движения. Это, в свою очередь, усложняет упомянутые ДЗ как структурно, так и функционально. Лавинообразно растёт разнообразие реакций, требуемых от МЛП 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, экстремальных – взамен предсказуемых, стандартных, паттерных. Парировать описанную коллизию невозможно без радикального повышения динамических ресурсов системы.

Результаты исследований. 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 голономны, 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 [3] и не сокращают

число степеней свободы своих систем. Достигнуть управляемости таких систем возможно лишь, преодолев упомянутые избыточные степени свободы [4].

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 [5].

Гораздо более рациональным и приемлемым для МЛП способом преодоления избыточных степеней свободы расчётной схемы (РС) его механической подсистемы (МПС) является координация её движений [6], 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:

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

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 ее 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:

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

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

Поэтому степень влияния возмущающих $Q_\alpha \forall \alpha \in \overline{[1, N]}$ и управляющих $V_\alpha \forall \alpha \in \overline{[1, N]}$ воздействий на каналы подсистемы также зависит от её структуры. Иными словами, результатом любой особенности РС МПС МЛП, ведущей к взаимосвязанности её координат, является недиагональность матрицы $\{a_{\lambda\mu} \forall \lambda, \mu \in \overline{[1, L]}\}$. Исходя из этого, степень связанности упомянутых координат можно эффективно характеризовать значениями элементов $a_{\lambda\mu} \forall \lambda \neq \mu; \lambda, \mu \in \overline{[1, L]}$ 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 $\gamma^\rho = \{\eta^\lambda, \dot{\eta}^\lambda \forall \lambda \in \overline{[1, L]}\} \forall \rho \in \overline{[1, 2 \cdot L]}$ 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, стимулируемое желанием упростить управление указанными координатами, может акцентироваться условиями нежелательности (или даже недопустимости) их взаимовлияния. Тогда разделение может быть достигнуто, 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, взаимодействие 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 $\gamma^{\rho} = \{\eta^{\lambda}, \dot{\eta}^{\lambda} \quad \forall \lambda \in [1, J/2]\} \quad \forall \rho \in [1, J]$, подлежащих автономному управлению ими, может обеспечиваться, например, с помощью игровых минимаксных [7], а также терминальных [8] методов управления, концептуально гарантирующих заданное качество этого движения.

Качество движения МЛП трудно описуемо глобальным показателем. Обычно имеется ряд критериев, разносторонне характеризующих такое качество. Типичен случай, когда эти критерии: антагонистичны в отношении структуры, параметров и управлений поезда; несоизмеримы по физическому смыслу; не автономны. Поэтому, в общем случае, качество динамики МЛП может быть описано лишь системой антагонистичных, несравнимых взаимно влияющих критериев. Её уместно назвать критериальной системой динамики (КСД) МЛП.

Назначение движения однозначно определяет его ДЗ. Она же, как правило, исчерпывающе описуема лишь лексикографически. Формализация описания назначения движения, необходимая для разработки алгоритма его построения, достижима после перехода к целям движения (ЦД). Степень достижения каждой из них характеризуется соответствующим критерием – элементом КСД. Для глобальной же количественной характеристики качества решения ДЗ в целом необходим интегративный показатель такого качества, синтетически учитывающий характер и специфику элементов КСД, а также её структуру.

Проблема отыскания такого показателя именуется скаляризацией частных критериев качества [9]. Ныне имеется большое число подходов к её решению [9, 10, 11, 12, 13]. Многие из них нетривиальны и имманентно релевантны отдельным аспектам проблемы скаляризации. Однако, ни один из этих подходов не позволяет в полной мере удовлетворить указанные требования к результирующему глобальному показателю качества движения.

Технико-экономическая концепция создания артефакта [14, 15] предполагает, что основными критериями, которые должны быть учтены показателем качества достижения любой ЦД, являются эффективность и ресурсоёмкость такого достижения. Получаемые в результате показатели называют ресурсо-эффективными. Для расчета их значений все ресурсы, затрачиваемые на достижение цели, приводятся (если это возможно) к единому стоимостному показателю. В практике создания технических систем наиболее часто используются [12, 16] три показателя упомянутого типа. Первый из них – эффективный при наложении ограничения на ресурсный критерий. Второй такой показатель – ресурсный при наложении

ограничения на эффективностный критерий. Смысл третьего из указанных показателей – стоимость единицы эффективности достижения цели движения (то есть удельная стоимость). Если преследуется j -ая ЦД в его i -ой ситуации, то значение последнего показателя может быть определено выражениями

$$g_{ij} [u(\bullet), w(\bullet)] = c_{ij} [u(\bullet), w(\bullet)] \cdot e_{ij}^{(-1)} [u(\bullet), w(\bullet)]; \quad (4)$$

$$u(\bullet) \in U(\bullet); w(\bullet) \in W(\bullet),$$

где c_{ij}, e_{ij} – показатели стоимости и эффективности достижения указанной цели; $u(\bullet), w(\bullet); U(\bullet), W(\bullet)$ – управляющие и возмущающие воздействия на МЛП, а также ограничения на пространства, которым принадлежат возможные реализации таких воздействий.

Здесь и далее функция с точкой на месте аргумента подразумевает всю совокупность её возможных значений.

Результаты анализа приведённых трёх показателей свидетельствуют о том, что: первый и второй из них полностью идентичны и взаимно однозначно определяют друг друга; последний из показателей является общим случаем первых двух. Кроме того, третий показатель более двух иных отвечает антагонистическому характеру элементов КСД, поскольку включает противоречивые факторы. Вследствие отмеченных преимуществ, показатель (4) следует предпочесть другим рассмотренным в качестве типового элемента (ТЭ) КСД.

Эффективность достижения совокупности целей, обеспечивающих решение q -ой ДЗ в i -ой ситуации, может быть описана вектором

$$\{g_{ij} [u_{ij}(\bullet), w_i(\bullet)]; u_{ij}(\bullet) \in U_{ij}(\bullet), w_i(\bullet) \in W(\bullet) \forall j \in [\overline{1, \Xi}]_q\}, \quad (5)$$

где $U_{qij}(\bullet)$ – множество допустимых решений однокритериальной оптимизационной задачи (ОЗ) синтеза управления, минимизирующего значение g_{qij} ; Ξ_q – общее число упомянутых целей.

Тогда (в предположении, что вектор u_{qij} 1-мерен) для обеспечения возможности совместного достижения таких целей необходимо, чтобы

$$U_{qij}(\bullet) \subseteq U(\bullet) \subseteq E^1 \forall j \in [\overline{1, \Xi}]_q, \quad (6)$$

где E^1 – 1-мерное евклидово пространство.

Последнее условие формализует требование изменения критериев (5) на едином множестве $U(\bullet)$ и позволяет преобразовать совокупность этих критериев к виду

$$g_{qij} [u_{qij}(\bullet), w_{qi}(\bullet)]; u_{qij}(\bullet) \in U(\bullet), w_{qi}(\bullet) \in W(\bullet) \forall j \in [\overline{1, \Xi}]_q. \quad (7)$$

В таком случае, из решения Ξ_q однокритериальных ОЗ вида

$$\gamma_{qij} = \inf_{u_{qij}(\bullet)} \{g_{qij} [u_{qij}(\bullet), w_{qi}^*(\bullet)]; u_{qij}(\bullet) \in U(\bullet), w_{qi}^* \in W(\bullet)\} \forall j \in [\overline{1, \Xi}]_q \quad (8)$$

могут быть найдены частные управления

$$\hat{u}_{qij}(\bullet) = \{\hat{u}_{qijk}(\bullet) \forall k \in \overline{[1, L]}\}^T \forall j \in \overline{[1, \Xi_q]}, \quad (9)$$

каждое из которых оптимально относительно одного из критериев (7).

Свойством этих критериев является их взаимная антагонистичность. Поэтому полное оптимальное управление системы

$$\hat{u}_{qi}(\bullet) = \{\hat{u}_{qijk}(\bullet) \forall j \in \overline{[1, \Xi_q]} k \in \overline{[1, L]}\}^T \quad (10)$$

на множестве $U(\bullet)$ должно занимать некоторое промежуточное положение между управлениями (9). Для нахождения управления (10) из упомянутого множества $U(\bullet)$ необходимо выделить элементы, отвечающие идее компромисса между экстремальными значениями критериев (7). Такие элементы, как известно, образуют область Парето [9, 17] (π -область), внутри которой невозможно не ухудшение одновременно всех частных критериев (7). Поэтому управление $[\hat{u}_{qi}]_{\pi}(\bullet)$ паретооптимально по таким критериям, если

$$\neg \exists u_{qi}(\bullet) \mid g_{qij}[u_{qi}(\bullet), w_{qi}^*(\bullet)] \leq g_{qij} \{[\hat{u}_{qi}]_{\pi}(\bullet), w_{qi}^*(\bullet)\} \forall j \in \overline{[1, \Xi_q]} \quad (11)$$

и хотя бы для одного $j \in \overline{[1, \Xi_q]}$ последнее неравенство – строгое. Для выпуклых целевых функций (7) выделение точек π -области (области компромиссов) $\{U(\bullet)\}_{\pi}$ может быть получено [18] в виде

$$p_{qij} \{[\hat{u}_{qij}]_{\pi}(\bullet), w_{qi}^*(\bullet)\} = \min_j p_{qij} [u_{qij}(\bullet), w_{qi}^*(\bullet)]; \quad p_{qij} = \lambda_{qij} \cdot g_{qij} \quad (12)$$

$$\forall j \in \overline{[1, \Xi]},$$

где $\lambda_{qij} \forall j \in \overline{[1, \Xi_q]}$ – постоянные для каждой точки $[\hat{u}_{qij}]_{\pi} \forall j \in \overline{[1, \Xi_q]}$ положительные коэффициенты $\lambda_{qij} \in [0, \infty] \forall j \in \overline{[1, \Xi_q]}$.

Выражению для определения интегративного показателя качества движения зачастую может быть придан вид функционала

$$J \{x[\bullet, u(\bullet), w(\bullet)]\}, \quad (13)$$

где $x(\bullet) = \gamma^{\rho} = \{\eta^{\lambda}, \dot{\eta}^{\lambda} \forall \lambda \in \overline{[1, L]}\} \forall \rho \in \overline{[1, 2 \cdot L]}$.

При этом поскольку, как отмечено, $w(t) \forall t \in [s, T]$ обычно непредсказуемы, то гарантированно приемлемое качество каждой реализации процесса в системе при любых возможных таких возмущениях может быть достигнуто лишь при действии на МЛП $u(t) \forall t \in [s, T]$, полученных из минимаксного дифференциально-игрового соотношения [7] вида

$$I = \inf_{u(\bullet)} \sup_{w(\bullet)} J \{x[\bullet, u(\bullet), w(\bullet)]\} = \inf_{u(\bullet)} \sup_{w(\bullet)} \left\{ \int_s^T \lambda [u(\bullet), w(\bullet)] \cdot dt : \right. \quad (14)$$

$$\left. : u(\bullet) \in U, w(\bullet) \in W, t \in [s, T] \right\},$$

где I – показатель качества управления $u(\bullet)$; $\lambda(\bullet)$ – заданная функция своих аргументов; $[s, T]$ – интервал времени, на котором строится движение поезда.

Синтез стратегии $u(t) \forall t \in [s, T]$ должен явиться результатом функционирования 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 [19, 20] 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.

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

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.

Двигательные задачи, подлежащие решению (с их детализацией до преследуемых целей), должны ставиться перед системой извне (например, с помощью модуля-датчика) 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, датчиком, 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.

Выводы. 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, синтезируемых 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, а поэтому и его потребительские свойства, без затраты на это чрезмерных обобщённых ресурсов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коренев Г. В. Очерки механики целенаправленного движения / Г. В. Коренев. – М. : Наука, 1980. – 192 с.
2. Тяга поездов : учебное пособие для вузов / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин; [под ред. В. В. Деева]. – М. : Транспорт, 1987. – 264 с.
3. Берёзкин Е. Н. Курс теоретической механики / Е. Н. Берёзкин. – М. : Изд-во МГУ, 1974. – 645 с.
4. Управление движением механических систем / [Е. Я. Смирнов, В. Ю. Павликов, П. П. Щербаков, А. В. Юрков]. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1985. – 316 с.
5. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией/ [В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев]. – К. : Наук. думка, 2001. – 479 с.
6. Алгоритмы управления движением шагающего аппарата / [Д. Е. Охоцимский, А. К. Платонов, Г. К. Боровин, И. И. Карпов, В. Е. Павловский, В. С. Ярошевский]. – М. : ИПМ АН СССР, 1972. – 38 с. – (препринт № 63 ИПМ АН СССР).
7. Красовский Н. Н. Управление динамической системой. Задача о минимуме гарантированного результата / Н. Н. Красовский. – М. : Наука, 1985. – 520 с.
8. Бортовые терминальные системы управления : Принципы построения и элементы теории / [Б. Н. Петров, Ю. П. Портнов-Соколов, А. Я. Андриенко, В. П. Иванов]. – М. : Машиностроение, 1983. – 200 с.
9. Хоменюк В. В. Элементы теории многоцелевой оптимизации / В. В. Хоменюк. – М. : Наука, 1983. – 124 с.
10. Борисов В. Н. Проблемы векторной оптимизации / В. Н. Борисов // Исследование операций. Методологические аспекты : сб. научн. тр. – М., 1972. – С. 72-91.
11. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике / Т. Р. Брахман. – М. : Наука, 1984. – 288 с.

12. Захаров И. Г. Методы решения многокритериальной задачи оптимизации технических систем / И. Г. Захаров // Техника средств связи. Сер.: Техника подводной связи. – М., 1985. – Вып. 4. – С. 139-146.
13. Руа Б. Проблемы и методы принятия решения в задачах со многими целевыми функциями / Б. Руа // Вопросы анализа и процедуры принятия решений : сб. научн. тр. – М., 1976. – С. 20-58.
14. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход / Я. Дитрих. – М. : Машиностроение, 1981. – 456 с.
15. Бреслав Л. Б. Техничко-економическое обоснование средств освоения мирового океана. / Л. Б. Бреслав – Л. : Судостроение, 1982. – 187 с.
16. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике / Т. Р. Брахман. – М. : Машиностроение, 1984. – 288 с.
17. Pareto V. Cours d'economie politique. – Lausanne, 1896. – 506 p.
18. Карлин С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике / С. Карлин. – М. : Наука, 1964. – 838 с.
19. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : Мир, 1973. – 332 с.
20. Мангейм М. Л. Иерархические структуры / М. Л. Мангейм. – М. : Мир, 1970 – 180 с.

Поляков В.О., Хачапуридзе М.М. ДИНАМІКА МАГНІТОЛЕВІТУЧОГО ПОЇЗДА – ОСНОВА ЙОГО СПОЖИВЧИХ ЯКОСТЕЙ

Обґрунтовані раціональні шляхи підвищення якості руху механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда, як основи його споживчої цінності. Проаналізовані зовнішні та внутрішні фактори, що впливають на цю якість. Розроблені шляхи поліпшення такого впливу. Прогнозована значимість розробленої методики побудови високоякісного руху поїзда.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, механічна підсистема, розрахункова модель.

Poliakov V.O., Khachapuridze M.M. DYNAMICS OF THE MAGNETIC CUSHION TRAIN – THE BASIS OF ITS CONSUMER QUALITY

Proved the rational ways of improvement the quality movement of a mechanical subsystem of the magnetic cushion train, as a base of its consumer value. The external and internal factors affecting the quality are analyzed. Ways of improvement of such influence are developed. Significant importance of the developed technique in construction of train's high-quality movement is predicted.

Keywords: the magnetic cushion train, mechanical subsystem, simulation model.