

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Голицыной Марии Вадимовны
на тему: «Анализ, управление и оптимизация движения
вибрационного робота»
по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Диссертация М.В. Голицыной посвящена исследованию динамики и процессов управления движением вибрационных локомотивных систем. Такие системы состоят из жесткого корпуса и внутренних тел, которые взаимодействуют с корпусом посредством управляющих сил, создаваемых приводами. Корпус системы взаимодействует с внешней средой, непосредственно контактируя с ней. Внутренние тела с внешней средой не взаимодействуют. Будучи, приложенными к корпусу, силы его взаимодействия с внутренними телами изменяют скорость корпуса относительно среды, что ведет к изменению силы, приложенной средой к корпусу. Таким образом, управляя внутренними силами (посредством которых корпус взаимодействует с внутренними телами), можно, благодаря наличию среды, управлять внешними силами и, тем самым, движением системы как целого. Как правило, возбуждение движения таких систем происходит в периодическом режиме (периодически изменяются либо силы взаимодействия внутренних тел с корпусом либо расстояния между корпусом и внутренними телами). Описанный принцип движения имеет много общего с классическим принципом виброперемещения. Однако при виброперемещении перемещаемое тело пассивно, а активна внешняя среда, которая колеблется по определенному закону относительно инерциальной системы отсчета. Колеблущаяся среда, взаимодействуя с телом, вызывает его перемещение в среднем в желаемом направлении. Принцип виброперемещения широко используется в технике для транспортировки

сыпучих материалов в цехе или на рабочей площадке при их подаче на участок обработки или иного использования. В локомотивных вибрационных системах активна сам перемещающийся объект, а среда пассивна. Классическое виброперемещение исследовано к настоящему времени достаточно полно. Динамические возможности локомоции систем за счет движения внутренних тел и, в особенности, проблемы управления такими системами изучены недостаточно. К локомотивным вибрационным системам сейчас проявляется большой интерес с связи с созданием мобильных мини- и микророботов. Этот интерес проявляется ростом публикаций на эту тему как в России, так и за рубежом. Роботы, перемещающиеся за счет движения внутренних тел, просты конструктивно, не требуют сложных трансмиссий для передачи движения от двигателя к движителю. Их корпус может быть сделан герметичным и геометрически гладким, не имеющим заострений и выступающих деталей. Последнее обстоятельство делает перспективным использование таких мобильных систем в «ранимых» средах, в частности, в медицине для малоинвазивных операций по прецизионной доставке диагностического датчика или медикамента к пораженному внутреннему органу.

Таким образом, локомотивные вибрационные системы – это сложные механические системы, динамика и возможности управления движением которых с фундаментальной точки зрения изучены недостаточно. Это обстоятельство в сочетании с востребованностью знаний о таких системах инженерами в области робототехники обуславливает **актуальность** исследований, которым посвящена диссертация М.В. Голицыной, и адекватность методов **теоретической механики** этим исследованиям.

М.В. Голицына в своей диссертации исследует локомотивную вибрационную систему с дебалансным вибровозбудителем. Система состоит из жесткого корпуса, который может перемещаться поступательно вдоль прямой по горизонтальной плоскости. Между корпусом и плоскостью опоры

действует сухое трение, подчиняющееся закону Кулона. Внутри корпуса расположен дебалансный вибровозбудитель, представляющий собой ротор, вращающийся вокруг оси, неподвижной относительно корпуса, причем центр масс ротора не лежит на оси его вращения. В работе М.В. Голицыной предполагается, что ось вращения вибровозбудителя есть главная ось инерции ротора, параллельна плоскости опоры корпуса и перпендикулярна прямой, вдоль которой он движется. Автор исследует «плоскую» модель системы, в которой центр масс корпуса и ротора находятся в одной вертикальной плоскости, проходящей через линию движения системы. В такой модели ротор может моделироваться математическим маятником, масса точки которого равна массе ротора, а длина равна расстоянию от оси вращения до центра масс ротора. Управление системой осуществляется вращением маятника. За управляющую переменную, подлежащую непосредственному регулированию, принимается угловая скорость вращения маятника. В общем случае на эту переменную налагается ограничение по абсолютной величине. Автор интересуется движениями системы, при которых (1) маятник осуществляет вращения в одном направлении; (2) движение корпуса происходит без отрыва от поверхности; (3) корпус системы либо движется в заданном направлении («вперед») либо покоится, но никогда не движется назад. Целью исследования является построение и исследование законов управления, обеспечивающих такие движения, а также их оптимизация с целью увеличения средней скорости движения системы и снижения потерь энергии на компенсацию работы сил сухого трения.

Во **введении** к диссертации М.В. Голицына дает аналитический обзор современного состояния проблемы, которой посвящена диссертация, и на основании проведенного анализа обосновывает **актуальность** темы своего исследования с фундаментально-научной и прикладной точек зрения. Проведенный анализ мне представляется полным и обстоятельным. Он свидетельствует об очень хорошей осведомленности диссертанта об

исследованиях, ведущихся в России и за рубежом по локомотивным системам вибрационного принципа действия и о публикациях по этой тематике.

Основной материал диссертации изложен в шести главах.

В главе 1 выведены уравнения динамики рассматриваемой механической системы и в аналитической форме построено управление, которое реализует движение системы, обладающее следующими свойствами:

1. На интервале времени, в течение которого маятник совершает один оборот, движение корпуса имеет два характерных подынтервала, на одном из которых он покоится, а на другом движется в заданном направлении.
2. Положения маятника, отвечающие началу и концу интервала покоя корпуса симметричны относительно вертикальной оси, проходящей через точку подвеса, а угловая скорость маятника в этих положениях одна и та же.

Построенное движение содержит интервал, на котором давление корпуса на плоскость перемещения и, следовательно, сила трения, равны нулю. Управление строилось так, чтобы увеличить перемещение корпуса на таком интервале по сравнению с полным перемещением системы за один оборот маятника. Это уменьшает потери энергии на компенсацию работы сил трения в расчете на единицу пути.

Проведено численное моделирование поведения системы при построенном в главе 1 законе управления и при простом кусочно-постоянном законе управления (построенном диссертантом ранее), при котором вращение маятника происходит при постоянной максимально допустимой величине углового ускорения, а знак углового ускорения меняется один раз за оборот. Моделирование продемонстрировало, что новое управление может

значительно увеличить среднюю скорость движения локомотивной системы.

В главе 2 решается задача, аналогичная рассмотренной в главе 1, но при отсутствии требования симметрии положения маятника относительно вертикальной оси в начале и в конце фазы покоя корпуса и при дополнительном условии периодичности движения. Это условие подразумевает периодичность по времени вращения маятника и периодичность изменения скорости корпуса. Кроме, того, в отличие от предыдущей главы, в главе 2, кроме симметричного двустороннего ограничения на угловое ускорение маятника, рассматривается также случай, когда угловое ускорение ограничено положительной величиной только сверху, а ограничение снизу отсутствует. Построено параметрическое семейство управлений, решающих поставленную задачу. Проведена оптимизация по одному из параметров семейства с целью максимизации средней скорости движения системы. Оценивается выигрыш в средней скорости движения, достигаемый за счет снятия ограничения на управляющую переменную снизу. Находится минимальное значение углового ускорения маятника, отвечающее максимальной средней скорости движения системы при фиксированном ограничении углового ускорения маятника сверху.

В главе 3 строятся области в плоскости параметров – коэффициента трения корпуса локомотивной системы о плоскость опоры и максимально допустимого значения углового ускорения маятника, – для которых решения, предлагаемые в главе 2, существуют. Исследуется зависимость средней скорости движения локомотивной системы от ее параметров.

В главе 4 доказывается, что некоторые из построенных в главе 2 движений при ограничении на абсолютную величину углового ускорения маятника обеспечивают максимальную среднюю скорость центра масс системы.

В пятой главе для периодических движений, построенных в главе 2, оцениваются затраты энергии привода, обеспечивающего вращение маятника в заданном режиме. Предлагаются три способа подсчета энергии, отражающие, по мнению автора, различные режимы работы привода на этапах разгона и торможения маятника. Все способы основаны на подсчете работы, совершаемой силами, генерируемыми приводом. Дается сравнение различных построенных движений по критерию энергозатрат.

В главах 2 – 5 строились и анализировались программные управления, в которых основные параметры, в частности, моменты переключения между различными фазами, рассчитывались заранее и не корректировались в процессе движения системы. При таких управлениях вследствие непредсказуемых внешних возмущений или неточного знания параметров, в частности коэффициента трения между корпусом и поверхностью, по которой движется робот, реальная система не будет в точности отрабатывать желаемое движения. **В шестой главе** этот недостаток устраняется. Вводятся дополнительные измерения фазовых координат системы и формируются обратные связи в контуре управления, которые обеспечивают возврат системы на расчетное движение в случае схода с него. Модифицированное управление позволяет в частности вывести систему на расчетный оптимальный режим движения из состояния покоя корпуса. Предложен также прием, позволяющий в ходе движения уточнять значение коэффициента трения и перестраивать соответствующим образом режим управления. Работоспособность модифицированного обратными связями режима управления обосновывается компьютерным моделированием.

Диссертация содержит **приложение**, где определяются условия, при которых корпус робота не придет во вращение относительно одного из своих торцевых ребер. В основных главах диссертации отсутствие вращения корпуса предполагалось наряду с условием, что корпус робота не теряет контакта с поверхностью во время движения.

Диссертация М.В. Голицыной представляет завершённую научно-квалификационную работу, в которой получены **новые** научные результаты, относящиеся к **теоретической механике**. Полученные М.В. Голицыной результаты вносят заметный вклад в теорию локомоционных систем, перемещающихся в сопротивляющихся средах за счёт управляемого движения внутренних тел. Локомоционные системы с дебалансным вибровозбудителем, которые представляют объект диссертационного исследования М.В. Голицыной, образуют важный класс, имеющий большое значение для мобильной робототехники. Это обуславливается, прежде всего, чрезвычайно широкой распространённостью дебалансных возбудителей в вибрационной технике и простотой конструктивной реализации систем с такими возбудителями. Изучение предельных возможностей динамического поведения систем данного типа по различным критериям, которому по существу и посвящена диссертация М.В. Голицыной, - существенное направление развития теории вибрационных локомоционных систем. Диссертант исследует важнейшие характеристики таких систем, а именно, среднюю скорость движения и потребные энергозатраты.

Основной инструмент и цель исследования М.В. Голицыной – построение оптимального управления, обеспечивающего максимальную среднюю скорость при наложенных ограничениях. Эта задача содержит ограничения на управляющую и фазовые переменные и трудна для дедуктивного построения решения с помощью общих математических методов оптимального управления. Диссертант, исходя из динамических свойств рассматриваемой системы, следующих из законов механики, строит параметрическое семейство управлений, которое гипотетически содержит оптимальное управление; параметры управления находятся из условия максимизации средней скорости движения системы. После этого путем построения соответствующих оценок доказываемость оптимальности построенных управлений и, значит, их оптимальность.

Результаты и выводы диссертации достоверны, они в полной мере обоснованы математическими методами теоретической механики и методами численного анализа.

Диссертация свидетельствует о научной зрелости и высокой квалификации ее автора в области теоретической механики и механики управляемых систем. Автор умело разделяет основную задачу на подзадачи и для каждой подзадачи находит адекватный метод решения. М.В. Голицына отлично владеет аналитическим аппаратом теоретической механики, а также вычислительными методами и техникой компьютерного моделирования. Она умело сочетает эти методы при решении задач.

Результаты диссертации в достаточной мере опубликованы в ведущих отечественных журналах по механике, доложены на российских и международных конференциях, съездах и семинарах. Они получили известность и признание специалистов. Две ключевых для диссертации статьи опубликованы М.В. Голицыной в журналах «Прикладная математика и механика» и «Мехатроника, автоматизация, управление» без соавторов, что свидетельствует о научной самостоятельности диссертанта и о том, что результаты, выносимые на защиту, принадлежат ей лично.

С материалами диссертации М.В. Голицыной целесообразно ознакомиться исследователям и инженерам в области общей механики, механики вибрационных систем и робототехники. Результаты диссертации могут быть использованы в научно-исследовательских институтах и вузах, занимающихся проблемами механики и робототехники, в частности в Институте проблем механики РАН, Институте прикладной математики РАН, НИИ механики МГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Центральном научно-исследовательском институте робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург) и других.

Автореферат правильно и полно отражает материал диссертации.

По научному содержанию диссертации существенных замечаний нет. Есть незначительные замечания редакционного характера.

1. Некоторые сегменты диссертации трудно читаются из-за неполной, на мой взгляд, завершенности их изложения. Например, при доказательстве утверждения 2 на стр. 30 стоило бы привести уравнение, по которому рассчитываются угол отклонения и угловая скорость маятника в начале безопорной фазы движения робота. Тогда читатель мог бы убедиться в единственности решения данного уравнения, а не принимать это на веру и не восстанавливать окончание доказательства самому.
2. Встречается небольшое количество языковых опечаток, а также опечаток в математических выражениях. Так, например, значение интеграла (1.25) равно $4\sqrt{2}$, а не 8. Кроме того, в знаменателе подынтегральной функции подкоренное выражение, по-моему, должно быть умножено на 2. Тогда значение периода оборота маятника будет равно 4. Эти описки, к счастью, не повлекли ошибок в последующих формулах.
3. На стр. 32 написано: «...при отсутствии ограничений на угловое ускорение можно полагать, что на всем периоде достижимо движение без трения, и из уравнения (1.10) получаем, что на всем периоде ускорение центра масс равно нулю. Это означает, что система может поддерживать любую среднюю скорость, в том числе бесконечно большую». Процитированное утверждение требует комментария и уточнения. Действительно, при рассматриваемом режиме управления маятником, давление корпуса на плоскость опоры будет равно нулю при всех значениях $\varphi \neq 2\pi k$, где k - целое число, и на интервалах изменения φ , не включающих значения $\varphi = 2\pi k$, скорость центра масс робота будет постоянной. Однако всякий раз, когда угол φ переходит через значение $\varphi = 2\pi k$, скачком меняется величина

$-\dot{\varphi} \sin \varphi$, которая в безразмерных переменных представляет собой проекцию скорости центра масс маятника на вертикальную ось. Величину этого скачка можно посчитать, она равна 4. В безразмерных переменных, введенных автором, такой же по величине скачок претерпевает вертикальная составляющая импульса системы, причем изменение вертикальной составляющей импульса направлено вверх. Это означает, что в моменты перехода углом φ значений $\varphi = 2\pi k$ происходит мгновенный удар корпуса о поверхность перемещения. Скорость центра масс маятника в момент удара направлена вдоль линии движения корпуса в положительном направлении, а величина этой скорости – бесконечно большая. Корпус системы в этот момент движется относительно поверхности в отрицательном направлении с бесконечно большой скоростью. В результате удара из-за взаимодействия корпуса с поверхностью при наличии трения горизонтальная составляющая импульса системы приобретает положительное приращение, равное 4μ . Таким образом, при обсуждаемом режиме управления горизонтальная составляющая импульса системы и, следовательно, горизонтальная составляющая скорости центра масс, будут периодически получать одно и то же положительное приращение, возрастая до бесконечности. Сказанное означает, что при данном управлении поддержание какой бы то ни было конечной средней скорости центра масс невозможно.

Сделанные замечания не снижают высокой оценки диссертации М.В. Голицыной как научно-квалификационной работы.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту

