

На правах рукописи

Безмен Петр Анатольевич

**ДИНАМИКА МОБИЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО РОБОТА С
ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВНУТРЕННЕЙ МАССЫ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО Курский государственный технический университет на кафедре «Теоретическая механика и мехатроника»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Яцун С.Ф.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пановко Г.Я.

кандидат технических наук, доцент
Поляков Р.Н.

Ведущая организация: ФГУП «Курский НИИ» МО РФ

Защита состоится «02» декабря 2009 года в 12.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.01 при Курском государственном техническом университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Курского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 29 » октября 2009 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и
кандидатских диссертаций Д 212.105.01
кандидат технических наук, доцент

Б.В. Лушников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время практически во всех промышленно развитых странах интенсивно ведутся работы по созданию мобильных роботов. Одна из причин этого – необходимость выполнения технологических операций с высокой точностью позиционирования обрабатываемого объекта. Применяемые для перемещения объектов манипуляторы требуют использования различных прецизионных механизмов, в том числе шарико-винтовых передач, что приводит к высокой стоимости такого оборудования. Кроме этого, необходима жесткая привязка их основания к конструкциям обрабатывающих устройств,

Одним из перспективных способов перемещения обрабатываемых объектов является использование мобильных роботов, движущихся за счет вибрационного движения внутренних масс, управляя движением которых можно изменять силу реакции внешней среды, действующей на корпус робота, обеспечивая его движение в желаемом направлении и регулируя скорость перемещения. Вибропривод с поступательным движением внутренней массы является наиболее перспективным приводом для подобных устройств с точки зрения простоты и надежности. Движение твердого тела на вибрирующем основании изучалось И.И. Блехманом и другими. Вибрационный принцип движения мобильных устройств был обоснован в работах академика Ф.Л. Черноушко и его учеников. Исследования в данной области проводятся в Германии в Техническом университете г. Ильменау доктором К. Циммерманом, в Японии и других странах. В то же время конструкции роботов с виброприводами и их динамическое поведение изучены недостаточно, что значительно ограничивает широкое применение таких устройств. Поэтому необходимость исследования динамики движения вибрационных роботов с поступательным движением внутренней массы с целью расширения сферы применения этих устройств и увеличения точности их позиционирования является актуальной.

Объектом исследования данной работы являются динамические процессы, протекающие в мехатронной системе вибрационного робота с электромеханическим приводом, обеспечивающим периодическое поступательное движение внутренней массы.

Целью работы является повышение эффективности вибрационных мобильных роботов путем увеличения точности их перемещения, достигаемой за счет применения оптимального управляющего воздействия на движение внутренней подвижной массы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка математической модели движения вибрационного мобильного робота с поступательным движением внутренней массы.
2. Разработка алгоритма моделирования движения вибрационного робота с поступательным движением внутренней массы.
3. Исследование модели движения вибрационного робота по шероховатой поверхности для различных законов управляющего воздействия.
4. Определение параметров модели, оказывающих существенное влияние на законы движения внутренней подвижной массы и корпуса робота.
5. Разработка методики экспериментальных исследований движения вибрационного робота, которая позволяет подтвердить правильность выбора

математической модели движения вибрационного мобильного робота и модели сухого трения между корпусом робота и поверхностью его перемещения.

6. Разработка экспериментальной установки и проведение исследований движения прототипа вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой.

7. Разработка системы автоматического управления движением вибрационного мобильного робота и программного обеспечения её реализующего.

8. Разработка конструкции вибрационного мобильного робота, обеспечивающей возможность задать любое необходимое направление движения робота по плоской поверхности.

Методы исследования. При выполнении работы использованы методы теоретической механики, теории колебаний, теории автоматического управления.

Достоверность научных положений и результатов. Основные научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных положений и методов теоретической механики, теории колебаний, динамики машин, экспериментальных методов исследования. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации подтверждены экспериментальными данными и практическими результатами, полученными в работе.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель движения вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом поступательного движения внутренней массы по плоской поверхности с учетом модели сухого трения и наличием в работе системы автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы.
2. Выявлена обратная пропорциональная зависимость между управляющим напряжением питания и величинами промежутков времени его подачи на двигатель постоянного тока электромеханического привода внутренней массы робота для обеспечения повторяемости величины дискретного перемещения корпуса робота.
3. Определена область параметров управляющего напряжения приводом поступательного движения внутренней массы вибрационного робота, обеспечивающих заданную точность дискретного перемещения корпуса робота.

Практическая значимость. В результате исследований предложена конструкция вибрационного робота («Виброробот с одной подвижной массой» – патент РФ на полезную модель №2007131645/22 №69010, три решения о выдаче патентов на полезные модели: модель «Виброробот с вращающейся платформой» (№2009120087/22), модель «Виброробот с двумя подвижными массами» (№2009121934/22), модель «Виброробот с электромагнитом» (№2009118769/22)). Конструкция вибрационного робота может быть использована в качестве высокоточного транспортного средства (с возможной величиной дискретного перемещения до 20 мкм) и позволяет транспортировать миниатюрные объекты, изделия и детали для последующего проведения над ними технологических операций. Разработано программное обеспечение, которое может быть использовано для управления движением подобных вибрационному роботу устройств. В данном программном обеспечении реализован принцип управления с учетом параметров вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом поступательно движущейся внутренней массы.

Результаты исследований использованы при выполнении грантов РФФИ № 05-08-33382-а «Изучение закономерностей движения вибрационных мобильных роботов в различных средах» (2005-2007 г.г.), № 08-08-00438 «Динамика и управление движением автономных вибрационных мобильных микророботов по шероховатой поверхности» (2008-2010 г.г.), гранта ФАО НК-385П по теме «Изучение закономерностей управляемого движения мобильных вибрационных систем» (2009-2010 г.г.), а также в учебном процессе кафедры теоретической механики и мехатроники КурскГТУ.

Апробация диссертации. Основные положения диссертации доложены и одобрены на VII и VIII Международных научно-технических конференциях «Вибрационные машины и технологии» (г. Курск – 2005, 2008 г.), Научно-методической конференции «Образование через науку» (г. Курск – 2007 г.). За разработку «Виброробот с одной подвижной массой» получен диплом ФИПС (г. Москва, XI Салон промышленной собственности «Архимед» – 2008 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, включая 8 статей, из них 1 по перечню ВАК, 3 патента на полезную модель, 3 решения о выдаче патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 102 наименований и приложения. Текст диссертации изложен на 140 страницах текста, содержит 96 рисунков, 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, дана общая характеристика диссертации, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводится обзор литературных источников по вопросам разработки и проектирования вибрационных мобильных роботов, приведена классификация вибророботов. В основе этой классификации лежит как принцип вибрационного движения роботов, так и размерность пространства, в котором робот и его элементы перемещаются. В главе представлен подробный анализ различных конструкций вибрационных мобильных устройств.

Во второй главе предложена расчетная схема вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом поступательного движения внутренней массы.

Движение вибрационного мобильного робота по плоской поверхности с постоянной шероховатостью осуществляется за счёт периодического асимметричного движения внутренней массы по внутренней плоской поверхности корпуса робота.

Вибрационный мобильный робот с электромеханическим приводом внутренней подвижной массы (рис. 1) содержит: корпус 1, установленный внутри корпуса электромеханический привод внутренней подвижной массы, состоящий из реверсивного двигателя постоянного тока 2 и рейки реечной передачи 3, подвижную массу 4, направляющие 5 рейки реечной передачи, крепление двигателя 6. На рис. 1 цифрой 7 обозначена поверхность перемещения корпуса робота.

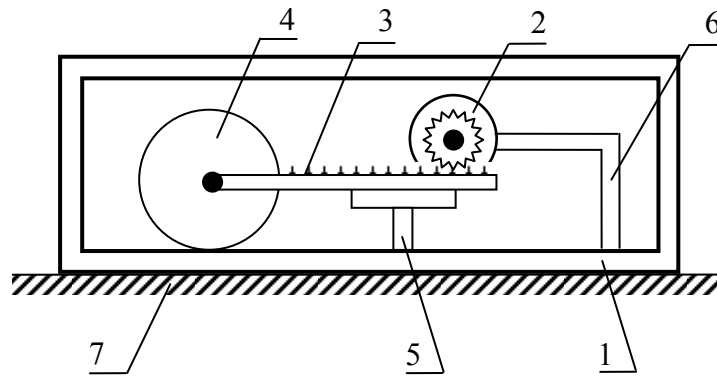


Рис. 1. Схема устройства вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом внутренней подвижной массы

При подаче управляющего напряжения на реверсивный двигатель постоянного тока 2 электромеханического привода (рис. 1) вал-шестерня двигателя 2 начинает вращаться, перемещая рейку реечной передачи 3. Перемещаясь, рейка изменяет положение свободно закрепленной подвижной массы 4 относительно корпуса 1 виброробота. Для хода рейки 3 реечной передачи электромеханического привода в обратную сторону управляющее напряжение, поступающее на реверсивный двигатель постоянного тока 2, меняет полярность, и вал-шестерня электродвигателя вращается в противоположную сторону, перемещая рейку 3 в обратном направлении вместе со свободно закрепленной подвижной массой 4.

Для составления дифференциальных уравнений движения введем две системы координат: XOY , в которой перемещается корпус робота массой M , и подвижную систему координат $X_1O_1Y_1$ (связанную с корпусом вибрационного робота), в которой перемещается внутренняя подвижная масса m робота (рис. 2).

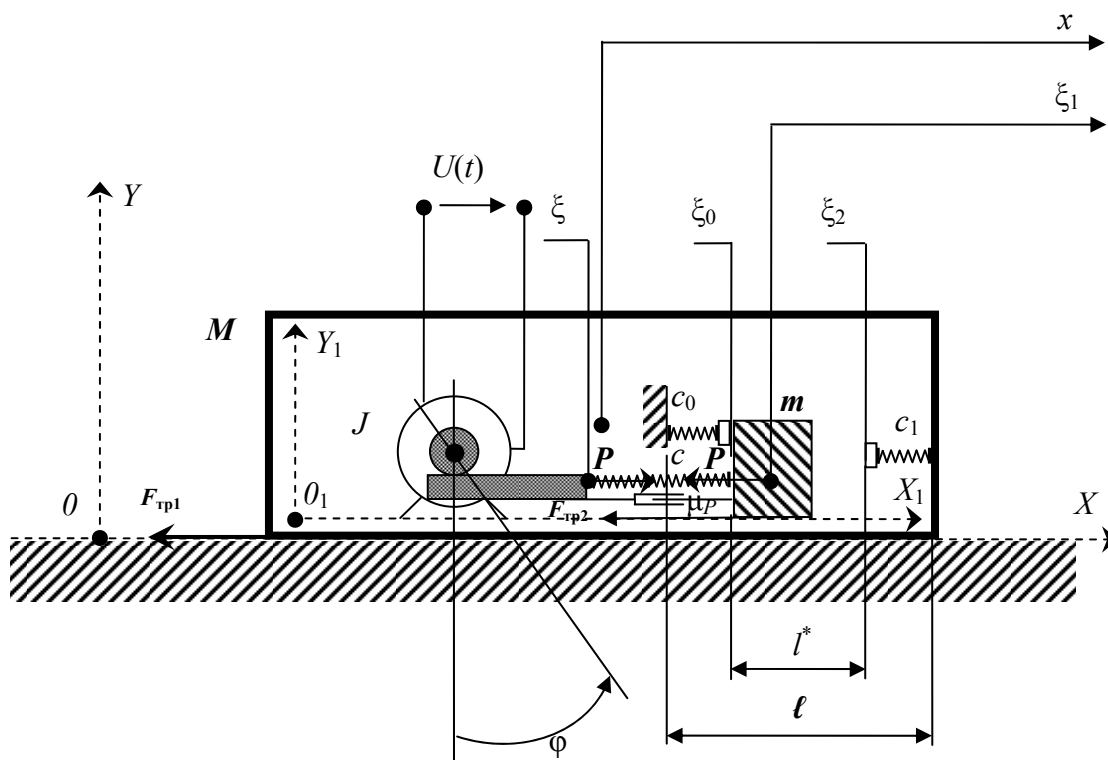


Рис. 2. Расчетная схема вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой

Предполагается, что реечная передача электромеханического привода внутренней подвижной массы обеспечивает связь без зазоров между углом поворота

вала двигателя постоянного тока и линейным перемещением рейки. При этом возможный общий ход l^* рейки реечной передачи меньше или равен максимальному ходу l или длине рейки: $l^* \leq l$. В данной модели рейка рассматривается как вязкоупругий элемент, т.е. при перемещении на массу m действует сила сопротивления P .

Для описания движения используются следующие координаты: $\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$ – перемещение, скорость, ускорение рейки реечной передачи в относительной системе координат $X_1O_1Y_1$, $\xi_1, \dot{\xi}_1, \ddot{\xi}_1$ – перемещение, скорость, ускорение внутренней подвижной массы в относительной системе координат $X_1O_1Y_1$, x, \dot{x}, \ddot{x} – перемещение, скорость, ускорение корпуса робота в абсолютной системе координат XOY , $\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$ – угловые перемещение, скорость, ускорение вала электродвигателя электромеханического привода.

В модели учтены силы трения: $F_{\text{тр1}}$ – сила сухого трения, приложенная к корпусу робота, $F_{\text{тр2}}$ – сила сухого трения, приложенная к внутренней подвижной массе робота. Перемещение массы m ограничено упругими ограничителями, имеющими коэффициенты жесткости c_0 и c_1 и координаты начальных положений ξ_0 и ξ_2 соответственно (упругие ограничители находятся в несжатом состоянии). На электромеханический привод внутренней массы m поступает управляющее напряжение $U(t)$. J – приведенный к оси электродвигателя привода суммарный момент инерции.

Систему уравнений, описывающих движение вибрационного мобильного робота, представим в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} M \ddot{x} + m(\ddot{x} + \ddot{\xi}_1) = F_{\text{тр1}} \\ m \ddot{\xi}_1 = -m \ddot{x} + P + F_{\text{тр2}} \\ J \ddot{\varphi} = C_M \cdot i_{\text{я}} - \mu \dot{\varphi} \\ L \left(\frac{di_{\text{я}}}{dt} \right) + r_{\text{я}} i_{\text{я}} + C_E \cdot \dot{\varphi} = U(t) \\ \xi = \varphi \cdot R \\ P = -c(\xi_1 - \xi) - \mu_F(\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}) + \begin{cases} (-c_1(\xi_1 - \xi_2)), & \text{если } (\xi_1 > \xi_2) \\ (-c_0(\xi_0 - \xi_1)), & \text{если } (\xi_1 \leq \xi_0) \\ 0, & \text{если } (\xi_0 < \xi_1 \leq \xi_2) \end{cases} \\ F_{\text{тр1}} = \begin{cases} -k_1(M + m)g \cdot \text{sign}(\dot{x}), & \text{если } (\dot{x} \neq 0) \\ -(m \cdot \ddot{\xi}_1), & \text{если } ((\dot{x} = 0) \text{ и } (|m \cdot \ddot{\xi}_1| \leq (k_1(M + m)g))) \\ -k_1(M + m)g \cdot \text{sign}(m \cdot \ddot{\xi}_1), & \text{если } ((\dot{x} = 0) \text{ и } (|m \cdot \ddot{\xi}_1| > (k_1(M + m)g))) \end{cases} \\ F_{\text{тр2}} = \begin{cases} -k_2mg \cdot \text{sign}(\dot{\xi}_1), & \text{если } (\dot{\xi}_1 \neq 0) \\ -((m \ddot{x}) + P), & \text{если } ((\dot{\xi}_1 = 0) \text{ и } (|m \ddot{x} + P| \leq (k_2mg))) \\ -k_2mg \cdot \text{sign}(m \ddot{x} + P), & \text{если } ((\dot{\xi}_1 = 0) \text{ и } (|m \ddot{x} + P| > (k_2mg))) \end{cases} \end{array} \right. \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент трения корпуса робота о плоскую поверхность движения робота; k_2 – коэффициент трения внутренней подвижной массы о внутреннюю плоскую поверхность корпуса робота; g – ускорение свободного падения; L и $r_{\text{я}}$ – суммарные индуктивность и сопротивление цепи якоря электродвигателя электромеханического привода внутренней подвижной массы; $i_{\text{я}}$ – ток цепи якоря электродвигателя электромеханического привода; C_E и C_M – коэффициенты пропорциональности (поток возбуждения электродвигателя электромеханического привода $\Phi = \text{const}$, $C_E = U_{\text{ном}} / \omega_{\text{ХХ}}$, $C_M = M_{\text{ном}} / I_{\text{я.ном}}$, $U_{\text{ном}}$ и $I_{\text{я.ном}}$ – номинальные значения напряжения и тока якоря электродвигателя электромеханического привода соответственно, $M_{\text{ном}}$ и $\omega_{\text{ХХ}}$ – номинальный вращающий момент и скорость идеального холостого хода электродвигателя соответственно); R – радиус вала-шестерни электродвигателя; μ – коэффициент вязкого сопротивления на валу электродвигателя; c – коэффициент жесткости рейки как упругого элемента; μ_p – коэффициент вязкого сопротивления рейки как демпфирующего элемента.

Первое уравнение системы (1) описывает динамику всего робота, второе – описывает динамику внутренней подвижной массы по отношению к корпусу робота. Третье уравнение системы представляет собой закон равновесия моментов на валу электродвигателя, четвертое уравнение – второй закон Кирхгофа для цепи якоря электродвигателя. Пятое уравнение системы – соотношение между углом поворота вала электродвигателя и линейной координатой рейки реечной передачи. Шестое уравнение системы связывает движение внутренней подвижной массы с движением рейки реечной передачи как с вязко-упругим элементом.

Модель сухого трения (2) представлена на рис. 3 в виде зависимости силы трения $F_{\text{тр}}$ от скорости тела \dot{x} , где: $F_{\text{тр}}^{(-)}$ – значение силы трения при отрицательном направлении движения тела, $F_{\text{тр}}^{(+)}$ – значение силы трения при положительном направлении движения тела.

$$F_{\text{тр}} = \begin{cases} -F_{\text{тр}}^{(+)}, & \dot{x} > 0, \\ (-F_{\text{тр}}^{(+)} \dots F_{\text{тр}}^{(-)}), & \dot{x} = 0, \\ F_{\text{тр}}^{(-)}, & \dot{x} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

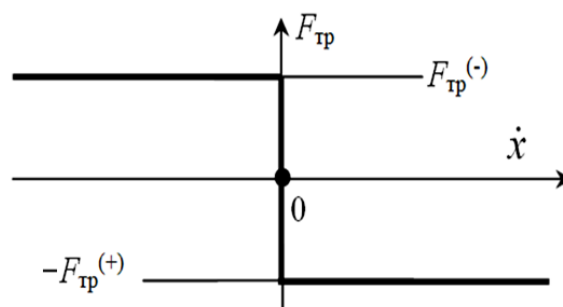


Рис. 3. Зависимость силы трения $F_{\text{тр}}$ от скорости тела \dot{x}

Согласно этой модели, сила трения при наличии скорости равняется своему предельному значению, равному $F_{\text{тр}}^{(\pm)} = -k^{(\pm)} \cdot mg \cdot \text{sign}(\dot{x})$, где $k^{(\pm)}$ – коэффициенты трения при движении тела с положительной и отрицательной скоростью \dot{x} соответственно, которые могут быть как равны, так и не равны друг другу. Когда тело движется с остановками, определение силы трения должно производиться из условий равновесия тела, так как в покое (при отсутствии скорости) сила трения является величиной, не определённой ни по знаку, ни по модулю, т.е. теоретически может равняться любой величине в интервале $(F_{\text{тр}}^{(-)}, F_{\text{тр}}^{(+)})$.

В главе изложена методика математического моделирования движения вибрационного мобильного робота. Разработан алгоритм моделирования движения вибрационного робота с поступательным движением внутренней массы. Разработанный алгоритм учитывает работу системы автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы робота с использованием ПИД-регулятора и возможностью моделирования управляющего напряжения питания привода внутренней подвижной массы.

В третьей главе, используя систему уравнений (1), путем математического моделирования исследуется движение вибрационного мобильного робота.

В работе Т.Ю. Фигуриной «Оптимальное управление движением системы двух тел по прямой» определены параметры оптимального трёхэтапного управления движением вибрационного робота. Оптимальное управление максимизирует среднюю скорость движения виброробота при заданном фиксированном периоде времени T . В роли оптимального управления выступает относительное ускорение внутренней подвижной массы A^* , имеющее три интервала постоянства в периоде времени T . При данном ускорении корпус робота часть периода T покоится, а оставшуюся часть – движется в желаемом направлении, и никогда не осуществляет реверса. Фиксированный период T (интервал времени $[0, T]$) представлен суммой трех

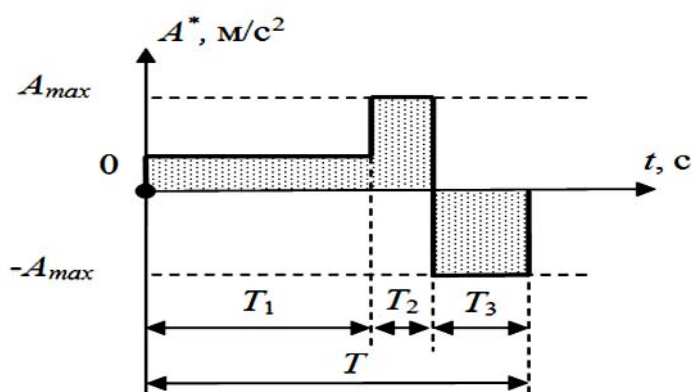


Рис. 4. Временная диаграмма ускорения A^* внутренней подвижной массы m виброробота

интервалов ($T_1 = [0, (T/2)]$, $T_2 = [(T/2), T - ((T/4)(1+\rho))]$, $T_3 = [T - ((T/4)(1+\rho)), T]$), на которых ускорение A^* постоянно и задается равенствами: $A^*_1 = (kg)/\mu_S = \rho \cdot A_{max}$, $A^*_2 = A_{max}$, $A^*_3 = -A_{max}$ соответственно (рис. 4), где: $\mu_S = m/(M+m)$, $\mu_S \in (0,1)$,

$$\rho = \frac{kg}{\mu_S A_{max}} \in (0,1), M - \text{масса корпуса}$$

робота, m – внутренняя подвижная масса, k – коэффициент трения корпуса робота о поверхность

движения робота, g – ускорение свободного падения.

Таким образом, оптимальное управление есть функция относительного ускорения внутренней подвижной массы $\ddot{\xi}_{1\text{оптим.}}(t)$. Проинтегрировав функцию $\ddot{\xi}_{1\text{оптим.}}(t)$ дважды по времени t , получаем оптимальные характеристики движения внутренней подвижной массы робота: перемещение $\xi_{1\text{оптим.}}(t)$ и скорость $\dot{\xi}_{1\text{оптим.}}(t)$ (рис. 5).

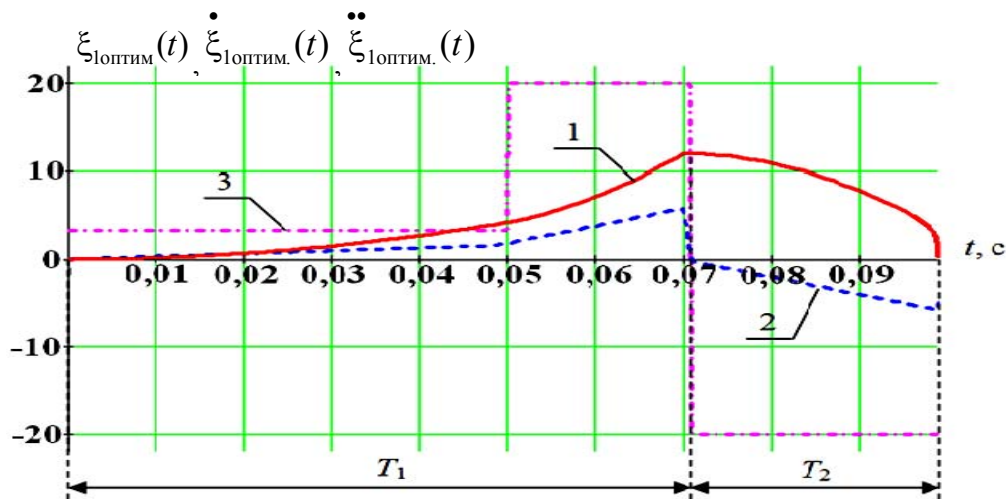


Рис. 5. Временная диаграмма характеристик движения внутренней массы m для обеспечения однократного перемещения виброробота: 1 – перемещение $\xi_{\text{оптим.}}(t) \cdot 10^3$, 2 – скорость $\dot{\xi}_{\text{оптим.}}(t) \cdot 10$, 3 – ускорение $\ddot{\xi}_{\text{оптим.}}(t) \cdot 10$.

На временной диаграмме оптимального перемещения $\xi_{\text{оптим.}}(t)$ внутренней подвижной массы можно выделить два этапа времени – T_1 и T_2 (рис. 5), где скорость $\dot{\xi}_{\text{оптим.}}(t)$ имеет разные знаки.

В главе предлагается использование обратной связи для поддержания требуемого оптимального перемещения $\xi_{\text{треб.}}$, равного $\xi_{\text{оптим.}}(t)$ как по величине максимального перемещения внутренней подвижной массы ξ_{max} , так и по форме временной диаграммы $\xi_{\text{оптим.}}(t)$ путем корректировки управляющего электромеханическим приводом напряжения питания $U_{\text{упр}}$, создав, таким образом, систему автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы вибрационного робота.

Задающим воздействием в данной системе управления является требуемое перемещение $\xi_{\text{треб.}}$, выходная величина системы – перемещение внутренней подвижной массы ξ_1 (рис. 6). $\Delta\xi$ – разность между требуемым оптимальным перемещением ($\xi_{\text{треб.}}$) и текущим перемещением внутренней подвижной массы (ξ_1): $\Delta\xi = \xi_{\text{треб.}} - \xi_1$. В ходе работы система управления последовательно корректирует $U_{\text{упр}}$ таким образом, чтобы получить на выходе перемещение внутренней подвижной массы ξ_1 , равное требуемому перемещению $\xi_{\text{треб.}}$.

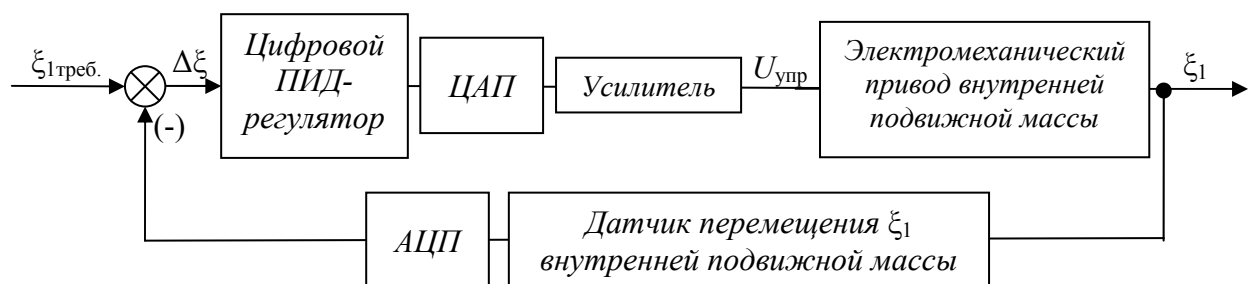


Рис. 6. Схема системы автоматического управления перемещением ξ_1 внутренней подвижной массы с применением ПИД-регулятора

При математическом моделировании были приняты следующие значения параметров вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой: $M = 0,1$ кг, $m = 0,4$ кг, $k_1 = 0,268$, $k_2 = 0,268$, $\xi_0 = 0,002$ м, $\xi_2 = 0,018$ м, $c = 2000$ Н/м, $c_0 = 1000$ Н/м, $c_1 = 1000$ Н/м, $\mu_p = 40$ (Н/м)·с, $\mu = 0,001$, $R = 0,0035$ м, характеристики электродвигателя электромеханического привода внутренней подвижной массы: $r_a = 2$ Ом, $L = 0,2 \cdot 10^{-3}$ Гн, $J = 0,0001 \cdot 10^{-3}$ кг·м², характеристики электродвигателя при $U_{упр} = \pm 12$ В: $\omega_{ХХ} = 1285$ рад/сек, $M_{ном} = 4,82 \cdot 10^{-3}$ Н·м, $I_{я.ном} = 0,4$ А. Максимальное значение $U_{упр}$ было принято равным ± 12 В. Результаты математического моделирования движения вибрационного мобильного робота с системой автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы приведены на рис. 7.

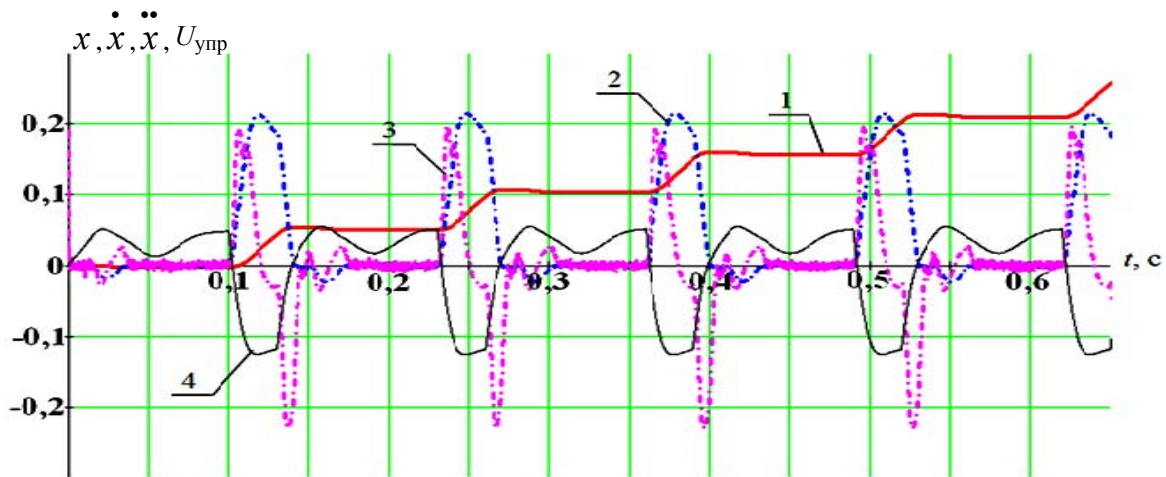


Рис. 7. Временная диаграмма характеристик движения корпуса вибрационного робота:

1 – перемещение x , м·10, 2 – скорость \dot{x} , м/с, 3 – ускорение \ddot{x} , м/с²·10⁻²,
4 – управляющее электромеханическим приводом внутренней подвижной массы напряжение питания $U_{упр}$, В·10⁻²

В ходе математического моделирования движения вибрационного мобильного робота было смоделировано управляющее напряжение питания $U_{упр}$. Напряжение питания $U_{упр}$ можно аппроксимировать напряжением U с постоянными уровнями $U_{упр1}$ и $U_{упр2}$ в течение промежутков времени T_1 и T_2 соответственно (рис. 8).

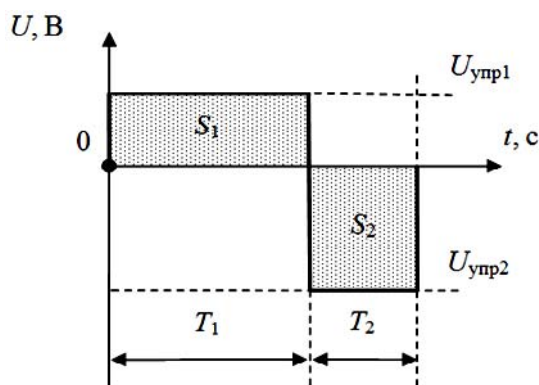


Рис. 8. Временная диаграмма управляющего электромеханическим приводом напряжения питания для обеспечения однократного перемещения корпуса виброробота

и $U_{упр2}$ в течение промежутков времени T_1 и T_2 соответственно (рис. 8).

Управление величинами T_1 , T_2 , $U_{упр1}$ и $U_{упр2}$ позволяет задать направление движения корпуса вибрационного робота, его скорость и величину дискретного (однократного) перемещения, а значит, задать точность позиционирования вибрационного мобильного робота.

С целью определения зависимости величины дискретного (однократного) перемещения корпуса робота от значений промежутков времени T_1 , T_2 , и величин $U_{упр1}$ и $U_{упр2}$ (рис. 8) напряжения питания $U_{упр}$, в ходе

моделирования были получены характеристики движения внутренней подвижной массы и корпуса виброробота – как для прямого, так и для обратного направления движения робота.

Исходя из результатов моделирования можно заключить, что достичь постоянства величины дискретного перемещения и избежать реверса корпуса робота можно, если соблюдается соотношение:

$$T_1 \cdot |U_{упр1}| = T_2 \cdot |U_{упр2}|. \quad (3)$$

Численный эксперимент позволил установить зависимость величины дискретного (однократного) перемещения корпуса робота от значения коэффициента трения между корпусом робота и поверхностью перемещения и от максимальной величины управляющего электромеханическим приводом внутренней подвижной массы напряжения питания $U_{упр}$ с учетом вышеуказанных параметров модели робота (рис. 9). Самые большие величины дискретного перемещения корпуса робота наблюдаются при значениях коэффициента трения, находящихся в диапазоне от 0,05 до 0,1.

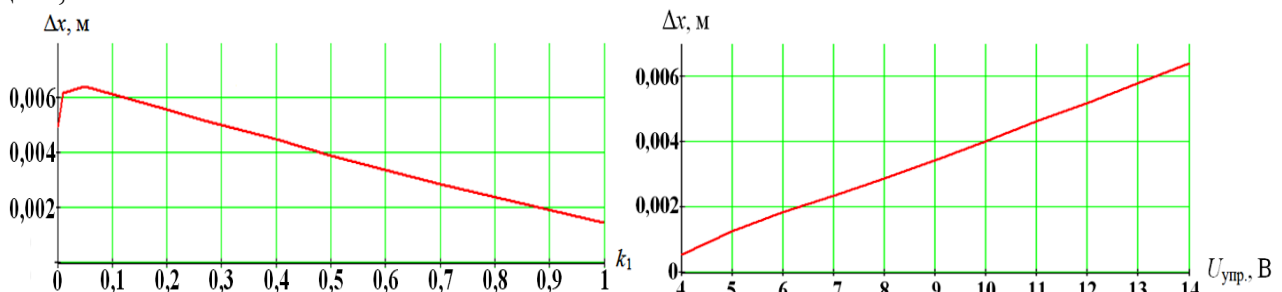


Рис. 9. Зависимость дискретного (однократного) перемещения Δx корпуса робота от величины коэффициента трения k_1 и максимальной величины управляющего напряжения питания $U_{упр}$

В рамках исследования дискретного перемещения корпуса вибрационного робота в микронном диапазоне было проведено изучение влияния отклонения от заданной величины коэффициента трения между корпусом робота и плоской поверхностью перемещения на повторяемость дискретного перемещения корпуса робота. Используя нормальное распределение, было смоделировано случайное изменение значения коэффициента трения в диапазоне от 0,3 до 0,5 при величине дискретного перемещения корпуса робота, равной 85 мкм – максимальное отклонение величины дискретного перемещения составило 12 мкм (рис. 10).

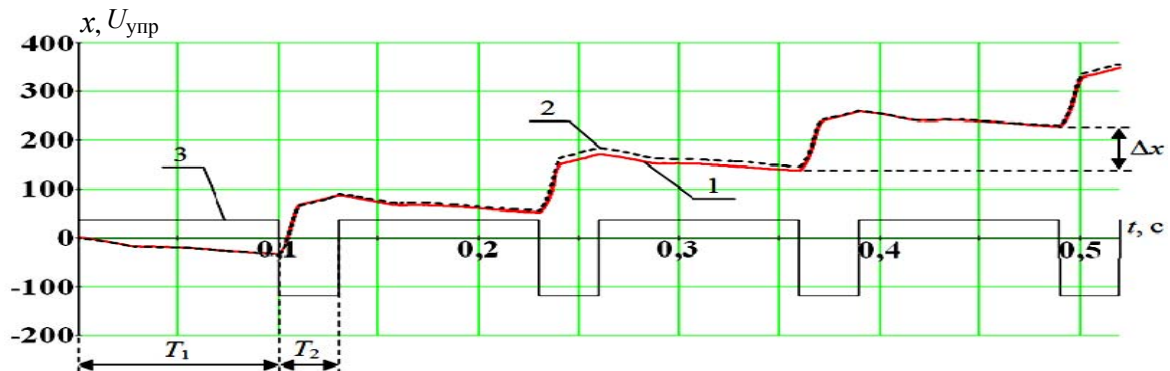


Рис. 10. Временная диаграмма перемещения x корпуса вибрационного робота с величиной дискретного перемещения Δx корпуса робота, равной 85 мкм (при $m = 1,500 \text{ кг}$, $M = 1,000 \text{ кг}$): 1 – перемещение x корпуса робота, мкм, при $k_1 = 0,4$, 2 – перемещение x корпуса робота, мкм, при $k_1 = 0,3 \div 0,5$, 3 – управляющее электромеханическим приводом внутренней подвижной массы напряжение питания $U_{упр}$, В·10

В четвертой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Проведен ряд экспериментов с целью исследования процессов движения корпуса и внутренней подвижной массы вибрационного робота, изучения характера изменения динамических параметров виброробота. Основной задачей экспериментального исследования являлось подтверждение основных положений теоретических исследований по методике расчета и определение оптимальных параметров вибрационного робота. После такого обоснования правильности расчетной математической модели можно уверенно применять ее как для синтеза вибрационных транспортных средств, так и для оптимизации параметров устройств подобного вида конструкции.

Для решения данной задачи был спроектирован и изготовлен экспериментальный исследовательский комплекс, позволяющий измерить динамические характеристики движения вибрационного мобильного робота, к которым относятся: перемещение x , скорость \dot{x} и ускорение \ddot{x} корпуса робота, перемещение ξ_1 , скорость $\dot{\xi}_1$ и ускорение $\ddot{\xi}_1$ внутренней подвижной массы робота, управляющее электромеханическим приводом внутренней подвижной массы напряжение питания $U_{упр}$.

В исследовательский комплекс входят (рис. 11): ПЭВМ IBM PC с внешним модулем АЦП/ЦАП системы сбора данных Е-14-440 фирмы ЗАО «L-Card», блок «Cyber-Box» для управления прототипом вибрационного робота и питания датчиков, разработанный и изготовленный прототип вибрационного мобильного робота со встроенными в него датчиками, программный комплекс для управления движением прототипа вибрационного робота и проведения измерений.

С целью создания исследовательского комплекса на кафедре «Теоретическая механика и мехатроника» КурскГТУ разработан и изготовлен прототип вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой (рис. 12). Масса корпуса прототипа вибрационного робота – 0,1 кг, величина внутренней подвижной массы прототипа робота – 0,4 кг. Габаритные размеры прототипа робота – 210x84x125 мм. В управлении прототипом вибрационного робота применялась система автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы с использованием ПИД-регулятора, программно реализованного на ПЭВМ. Основные параметры, по которым сравнивались результаты экспериментов и данные, полученные из расчетов – величины перемещения внутренней подвижной массы и корпуса вибрационного робота.

Для осуществления регулирования скорости перемещения внутренней подвижной массы применяется управление напряжением питания электропривода в диапазоне $-12 \text{ В} \leq U_{упр} \leq +12 \text{ В}$ при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

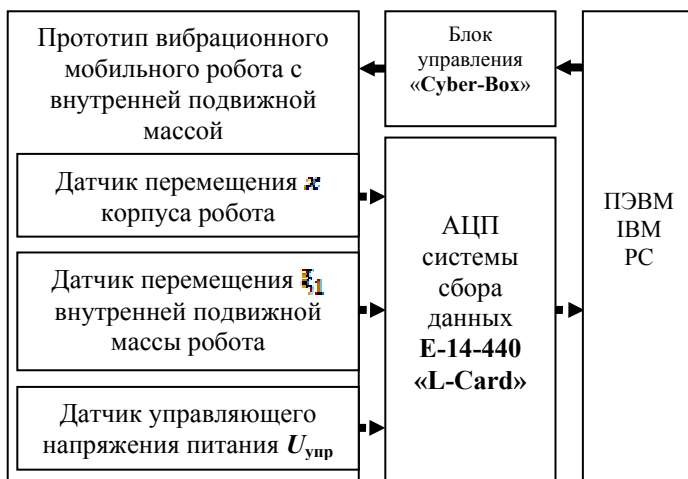


Рис. 11. Блок-схема комплекса для исследования характеристик движения вибрационного мобильного робота: сплошными стрелками указано управление, прерывистыми стрелками указана передача информации

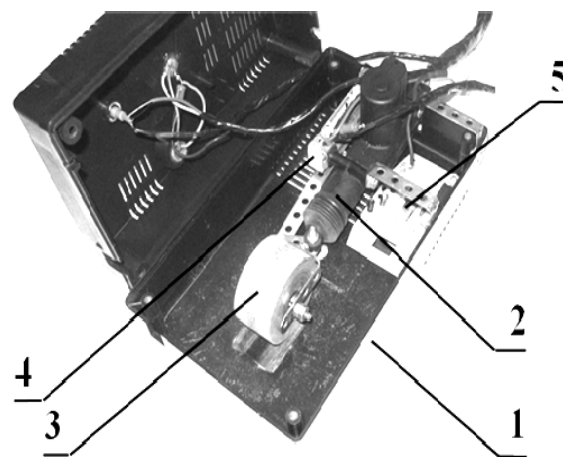


Рис. 12. Конструкция прототипа вибрационного мобильного робота: 1 – корпус, 2 – электромеханический привод внутренней массы, 3 – внутренняя масса, 4 – датчик перемещения внутренней массы, 5 – датчик перемещения корпуса робота

На временных диаграммах, приведенных на рис. 13–14, сравниваются характеристики движения виброробота, полученные экспериментально (ξ_1 , $\dot{\xi}_1$, $\ddot{\xi}_1$, x , \dot{x} , \ddot{x}) с их расчетными значениями, полученными в среде MathCAD при моделировании движения вибрационного робота (ξ_1 , $\dot{\xi}_1$, $\ddot{\xi}_1$, x , \dot{x} , \ddot{x}).

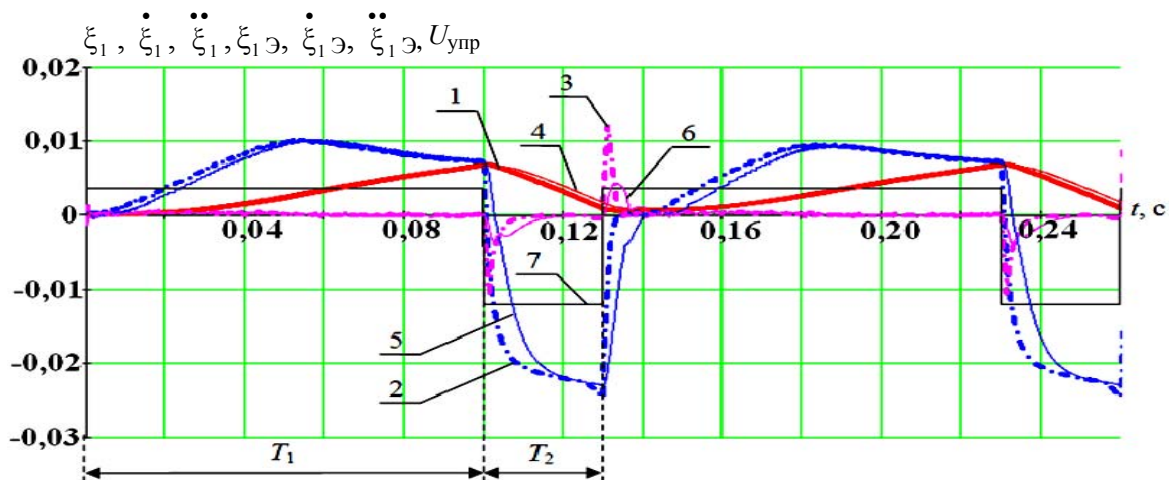


Рис. 13. Временная диаграмма характеристик движения внутренней подвижной массы при $T_1/T_2=0,100/0,030$ с: 1 – расчетное перемещение ξ_1 , м,

2 – расчетная скорость $\dot{\xi}_1$, м/с $\cdot 10^{-1}$, 3 – расчетное ускорение $\ddot{\xi}_1$, м/с $^2 \cdot 10^{-4}$,

4 – эксперим. перемещение ξ_1 , м, 5 – эксперим. скорость $\dot{\xi}_1$, м/с $\cdot 10^{-1}$,

6 – эксперим. ускорение $\ddot{\xi}_1$, м/с $^2 \cdot 10^{-4}$, 7 – управляющее напряжение $U_{упр}$, В $\cdot 10^{-3}$

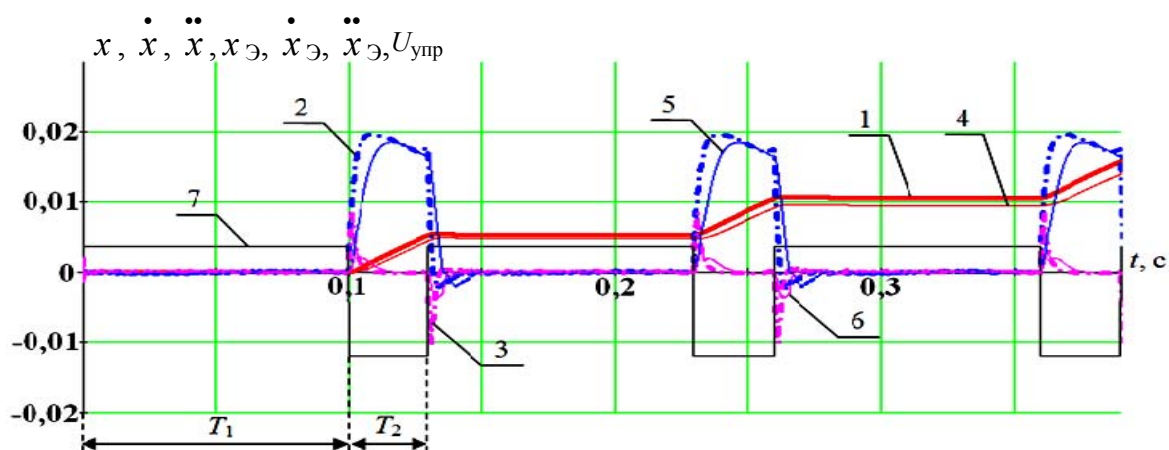


Рис. 14. Временная диаграмма характеристик движения корпуса робота при

$T_1/T_2=0,100/0,030$ с: 1 – расчетное перемещение x , м,
 2 – расчетная скорость \dot{x} , м/с $\cdot 10^{-1}$, 3 – расчетное ускорение \ddot{x} , м/с $^2 \cdot 10^{-4}$, 4 – эксперим.
 перемещение $x_{\text{э}}$, м, 5 – эксперим. скорость $\dot{x}_{\text{э}}$, м/с $\cdot 10^{-1}$,
 6 – эксперим. ускорение $\ddot{x}_{\text{э}}$, м/с $^2 \cdot 10^{-4}$, 7 – управляющее напряжение $U_{\text{упр}}$, В $\cdot 10^{-3}$

При математическом моделировании в среде MathCAD были приняты значения параметров изготовленного прототипа вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой. В ходе опытов и при математическом моделировании максимальное значение управляющего напряжения питания $U_{\text{упр}}$ принято равным ± 12 В.

Рассмотрение полученных в ходе опытов характеристик движения внутренней подвижной массы и корпуса прототипа виброробота подтверждает адекватность разработанной математической модели вибрационного робота реальному устройству. Результаты экспериментов показывают наличие устойчивых периодических процессов с периодом времени $T = T_1 + T_2$. Погрешность в определении динамических характеристик движения робота с использованием исследовательского комплекса не превышала 5%.

По результатам проведенных исследований предложена конструкция вибрационного мобильного робота с поступательно движущейся внутренней массой (рис. 15). Данная конструкция робота позволяет задать любое необходимое направление движения виброробота и предусматривает возможность фиксации виброробота с помощью электромагнита в необходимом положении для предупреждения возможного смещения его конструкции на плоской магнитной поверхности перемещения, также в конструкции достигается возможность повышения точности позиционирования перемещаемого полезного груза на вращающейся платформе виброробота без необходимости дополнительного маневра всей конструкции робота.

Конструкция мобильного вибрационного робота (рис. 15) содержит: среднюю круглую немагнитную платформу 8; закрепленный на платформе 8 электромеханический привод 3 поступательно движущейся внутренней массы 9; шаговый двигатель 6, установленный в центре нижней круглой немагнитной платформы 4, вал двигателя 6 закреплен в центре средней немагнитной платформы 8 с возможностью поворота последней относительно продольной оси корпуса виброробота на требуемый угол; электромагнит 7, жестко соединяющий нижнюю

немагнитную платформу 4 и круглую магнитную платформу-корпус 5; верхнюю немагнитную платформу 2; установленный в центре платформы 2 шаговый двигатель 11, причем вал шагового двигателя 11 закреплен в центре горизонтальной вращающейся платформы 1, которая находится над верхней немагнитной платформой 2 и имеет возможность поворота на требуемый угол относительно продольной оси корпуса виброробота; направляющие-держатели 12 полезного груза робота, закрепленные сверху на горизонтальной вращающейся платформе 1; защитный кожух 10, закрывающий конструкцию виброробота.

Шаговый двигатель 6 осуществляет поворот средней немагнитной платформы 8 относительно продольной оси корпуса робота на требуемый для разворота поступательно движущейся внутренней массы 9 угол. Таким образом, достигается возможность задать любое необходимое направление движения виброробота.

С помощью электромагнита 7, магнитной платформы-корпуса 5 и магнитной плоской поверхности перемещения с постоянной шероховатостью осуществляется фиксация конструкции виброробота в любой необходимой области магнитной поверхности перемещения. При подаче напряжения на обмотку электромагнита 7 возникает магнитное поле, которое заставляет надежно прилипнуть магнитную платформу-корпус 5 к магнитной поверхности перемещения робота. Фиксация виброробота в необходимом положении для предупреждения возможного смещения его конструкции на плоской поверхности особенно важна при движении робота с величиной дискретного перемещения менее 1 мм.

Шаговый двигатель 11 осуществляет поворот вращающейся платформы 1 относительно продольной оси корпуса робота на требуемый угол. Таким образом, достигается возможность повышения точности позиционирования перемещаемого на вращающейся платформе 1 полезного груза без необходимости дополнительного маневра всей конструкции виброробота.

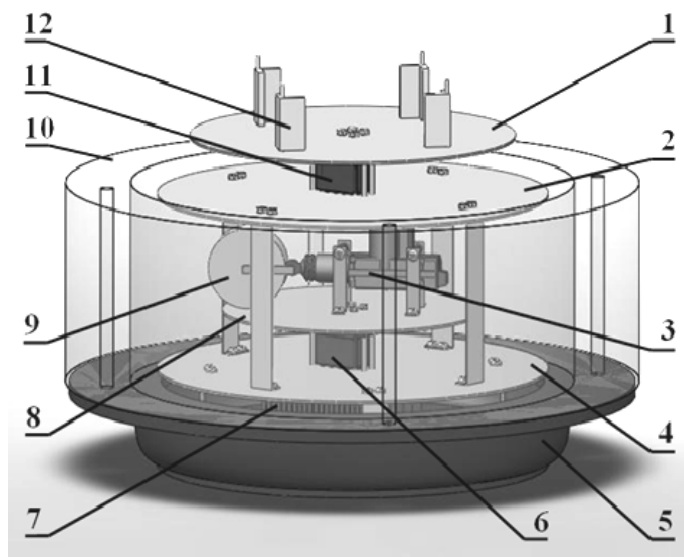


Рис. 15. Конструкция мобильного вибрационного робота для транспортировки деталей

Для управления движением прототипа вибрационного робота с электромеханическим приводом поступательно движущейся внутренней массы на кафедре «Теоретическая механика и мехатроника» КурскГТУ была разработана программа системы управления движением вибрационного робота для ПЭВМ «VibroBot–Cyber-Box», реализующая работу системы автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы с использованием цифрового ПИД-регулятора. Программа «VibroBot–Cyber-Box» написана на языке C++ в реализации Borland C++ Builder и

работает под управлением операционных систем Microsoft Windows 98/Me/2000/XP.

Интерфейс программы «VibroBot–Cyber-Box» позволяет произвести калибровку датчиков перемещения внутренней подвижной массы и корпуса прототипа робота, задать величины промежутков времени T_1 и T_2 и установить

максимальное значение перемещения ξ_1 внутренней подвижной массы для режимов движения робота «вперед» и «назад». Программа также позволяет реализовать режим «вибрация», при котором корпус робота совершает колебательное движение на плоскости за счёт периодического симметричного движения внутренней подвижной массы ($T_1 = T_2$). С помощью программы возможно как однократное дискретное перемещение прототипа робота по нажатию кнопки, так и циклический повтор выбранного режима движения, в течение которого корпус прототипа виброробота совершает движение в заданном направлении, т.е. многократно совершает дискретные перемещения на плоскости. Приложение «VibroBot–Cyber-Box» позволяет настроить скважность управляющего ШИМ-сигнала в соответствии с величинами промежутков времени T_1 , T_2 и максимальным значением перемещения внутренней подвижной массы робота. Программа «VibroBot–Cyber-Box» автоматически строит временные диаграммы перемещения внутренней подвижной массы и корпуса прототипа виброробота. Алгоритмы системы управления движением вибрационного робота, заложенные в программе «VibroBot–Cyber-Box», можно применить для управления устройствами, использующими принцип движения, подобный рассматриваемому в данной работе. Прототип вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом поступательно движущейся внутренней массы может быть использован в качестве учебного стенда для проведения лабораторных работ студентами специальности «Мехатроника» по курсам следующих дисциплин: «Теория автоматического управления», «Электромеханические и мехатронные системы», «Компьютерное управление мехатронными системами».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований и обобщений в диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Выявлено перспективное направление совершенствования мобильных вибрационных роботов, обеспечивающих управляемое движение по заданному закону с изменяемыми средней скоростью и величиной дискретного перемещения.

2. Разработана конструкция вибрационного мобильного робота на базе электродвигателя постоянного тока электромеханического привода поступательно движущейся внутренней массы.

3. Разработана адекватная (подтвержденная экспериментальными данными) математическая модель движения вибрационного мобильного робота на плоскости, описывающая движение корпуса вибрационного робота и его внутренней подвижной массы.

4. Разработан алгоритм моделирования движения вибрационного робота с поступательным движением внутренней массы. Разработанный алгоритм учитывает работу системы автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы робота.

5. Проведены численные исследования динамики движения вибрационного робота. Выявлено существенное влияние ряда параметров на законы движения внутренней подвижной массы и корпуса робота. Установлены значения основных параметров системы вибрационного робота, обеспечивающих устойчивый режим работы.

6. Разработана методика экспериментальных исследований движения вибрационного робота, позволившая получить на основе натурных испытаний картину происходящих в системе виброробота динамических процессов при различных режимах работы устройства.

7. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для изучения движения вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой. Прототип робота снабжен системой измерения параметров движения, устройствами обработки аналоговой и цифровой информации и системой автоматического управления перемещением внутренней подвижной массы робота, основанной на цифровом ПИД-регуляторе.

8. Разработана конструкция вибрационного мобильного робота, обеспечивающая возможность задать любое необходимое направление движения робота по плоской поверхности перемещения. По результатам исследований получено свидетельство РФ на полезную модель и получено три решения о выдаче патентов РФ на полезные модели.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации

1. Безмен, П.А. Исследование движения вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом внутренней подвижной массы / П.А. Безмен, С.Ф. Яцун // Известия ВУЗов. Машиностроение. – Москва, 2009. – №2. – С. 49-61.

Другие публикации

2. Безмен, П.А. Исследование управления движением робота-змеи / П.А. Безмен // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов: в 2 ч. – Курск: КурскГТУ, 2005. - Ч. 2. – С. 229-233.

3. Bezmen, P. Mathematical Modeling of Watching Electrical Drives / P. Bezmen, D. Tuladhar // International Conference on the Teaching of Mathematical Modelling and Applications: proceedings – Kathmandu (Nepal): Kathmandu University, 2007. – P. 51.

4. Безмен, П.А. Стенд для исследования движения мобильного вибрационного робота с внутренней подвижной массой / П.А. Безмен, Ю.Ю. Лосев // Образование через науку: материалы научно-методической конференции. – Курск: КурскГТУ, 2008. – С. 145-148.

5. Безмен, П.А. Экспериментальный стенд для исследования характеристик движения вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой / П.А. Безмен, Ю.Ю. Лосев // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов. – Курск: КурскГТУ, 2008. – С. 770-774.

6. Яцун, С.Ф. Математическое моделирование движения вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой / С.Ф. Яцун, П.А. Безмен, Ю.Ю. Лосев // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов. – Курск: КурскГТУ, 2008. – С. 241-247.

7. Яцун, С.Ф. Экспериментальное исследование движения вибрационного мобильного робота с внутренней подвижной массой / С.Ф. Яцун, П.А. Безмен, Ю.Ю. Лосев // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов. – Курск: КурскГТУ, 2008. – С. 763-770.

8. Безмен, П.А. Система автоматического регулирования уровня ускорения внутренней подвижной массы вибрационного мобильного робота / П.А. Безмен // Молодежь и XXI век: материалы докладов I международной молодежной научной конференции: в 6 ч. – Курск: КурскГТУ, 2009. – Ч. 3. – С. 114-118.

9. Виброробот с одной подвижной массой: пат. на полезную модель №2007131645/22 Рос. Федерация: МПК В 62 D 57/00 / Яцун С.Ф., Безмен П.А., Лосев Ю.Ю.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». – №69010; заявл. 20.08.07; опубл. 10.12.07, Бюл. №34.

10. Ползающий робот-змея: пат. на полезную модель №2007117311/22 Рос. Федерация: МПК В 62 D 57/00 / Яцун С.Ф., Безмен П.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». – № 67541; заявл. 08.05.07; опубл. 27.10.07, Бюл. №30.

11. Трехсекционный виброробот с дебалансным двигателем: пат. на полезную модель №2007139115/22 Рос. Федерация: МПК В 62 D 57/00 / Яцун С.Ф., Безмен П.А., Лосев Ю.Ю.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». – №85878; заявл. 22.10.07; опубл. 20.08.09, Бюл. №23.

12. Виброробот с вращающейся платформой: решение о выдаче патента на полезную модель №2009120087/22 Рос. Федерация: МПК В 62 D 57/00 / Яцун С.Ф., Безмен П.А.; заявитель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». – заявл. 26.05.2009.

13. Виброробот с двумя подвижными массами: решение о выдаче патента на полезную модель №2009121934/22 Рос. Федерация: МПК В 62 D 57/00 / Яцун С.Ф., Безмен П.А., Лосев Ю.Ю.; заявитель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». – заявл. 08.06.2009.

14. Виброробот с электромагнитом: решение о выдаче патента на полезную модель №2009118769/22 Рос. Федерация: МПК В 62 D 57/00 / Яцун С.Ф., Безмен П.А.; заявитель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». – заявл. 18.05.2009.

Подписано в печать _____ 2009. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Курский государственный технический университет.

Издательско-полиграфический центр

Курского государственного технического университета.

305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94