

*На правах рукописи*

Черепанов Андрей Андреевич

ДИНАМИКА ВИБРАЦИОННОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПО  
ВЕРТИКАЛЬНЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Курск – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» на кафедре Теоретической механики и мехатроники

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
Яцун Сергей Федорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
Пановко Григорий Яковлевич

кандидат технических наук, доцент  
Широков Сергей Викторович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
«Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН»

Защита состоится «31» марта 2011 года в 10.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.01 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета.

Автореферат разослан «        » февраля 2011 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 проблемы.** На протяжении многих лет наряду с традиционными методами движения мобильных систем (колесными, гусеничными, шагающими) внимание научного мира привлекает инерционный способ передвижения. Теоретические основы этого метода получили свое развитие в Институте проблем механики им. Ишлинского РАН, Юго-Западном государственном университете (г. Курск), Техническом университете Илменау (Германия) и других исследовательских центрах. Ввиду периодического характера движения внутренних подвижных масс такой принцип движения стал называться вибрационным. Такой способ движения исследовался в работах академика Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотника, Т.Ю. Фигуриной, К. Циммермана, И. Зейдиса, В.Г. Чашухина, П. Вартхолومهуса, С.Ф. Яцуна и др. В вибрационных роботах применяется контролируемое движение масс внутри корпуса мобильного объекта. Массы генерируют инерционные усилия, которые приложены к корпусу. С помощью таких инерционных усилий возможно управление силой реакции внешней среды на корпус робота, таким образом обеспечивается перемещение корпуса в нужном направлении. Применение таких схем позволяет размещать движущиеся части мобильного робота внутри абсолютно герметичного корпуса. При этом возможно совмещение в одном устройстве транспортных и технологических функций.

Одним из путей совершенствования вибророботов является создание устройств, способных перемещаться по вертикальным поверхностям. Такие устройства, обладающие преимуществом абсолютно герметичного корпуса, могут применяться при очистке корпусов судов, транспортировании диагностического и технологического оборудования в агрессивных средах, при наличии в воздухе взвешенных абразивных частиц, способных вывести из строя внешние движители мобильного робота.

Поэтому разработка и исследование вибророботов, способных передвигаться по вертикальным ферромагнитным поверхностям является актуальной задачей.

**Объектом исследования** данной работы являются динамические процессы, протекающие в мехатронной системе вибрационного робота оснащенного электромагнитом, обеспечивающим управление силой трения в зоне контакта корпуса с поверхностью, и электроприводом, позволяющим получить необходимое вращательное движение внутренней пары инерционных масс.

**Целью работы** является совершенствование мобильных вибророботов за счет обеспечения возможности их движения по вертикальной ферромагнитной поверхности и создание инструментальных средств проектирования таких устройств.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Разработка математической модели движения вибрационного мобильного робота, способного перемещаться по вертикальным ферромагнитным поверхностям посредством управляемого электромагнита и инерционной силы, создаваемой внутренними подвижными массами.

2. Разработка алгоритма решения дифференциальных уравнений описывающих движение вибрационного мобильного робота для перемещения по вертикальным ферромагнитным поверхностям.

3. Разработка системы автоматического управления вибрационным мобильным роботом, перемещающимся по вертикальным ферромагнитным поверхностям.

4. Исследование влияния конструктивных параметров вибрационного робота,двигающегося по вертикальным ферромагнитным поверхностям, и параметров его системы управления на режим движения и среднюю скорость.

5. Разработка макета конструкции виброробота для проведения экспериментальных исследований.

**Методы исследования.** При выполнении работы использованы методы теоретической механики, теории автоматического управления, вычислительной математики, электротехники, прикладного программирования.

**Научная новизна и положения, выносимые на защиту:**

1. Новый гибридный способ перемещения, сочетающий в себе применение двухвального дебалансного вибровозбудителя и управляемого электромагнита, позволяющего удерживать корпус робота на вертикальной ферромагнитной поверхности.

2. Математическая модель вибрационного управляемого робота для движения по вертикальным ферромагнитным поверхностям, учитывающая некулонову модель силы трения, действующую на корпус робота со стороны поверхности. При этом математическая модель описывает механическую систему, электромеханический привод, управляемый электромагнит, а так же систему временного программного и параметрического управления.

3. Двухканальная система автоматического управления, позволяющая синхронизировать вращение двухвального дебалансного вибровозбудителя, и включение-выключение электромагнита, прижимающего корпус робота к вертикальной ферромагнитной поверхности.

**Практическая ценность** работы заключена в разработке конструкции робота, а также в определении ее параметров, при которых возможно движение вверх по вертикальным ферромагнитным поверхностям.

*Результаты работы использованы при выполнении государственных контрактов П2228, П2285 в рамках федеральных целевых программ.*

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 10 печатных работах, включая 7 статей, из них 4 в изданиях рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в материалах международных конференций, три патента РФ на полезную модель.

**Апробация диссертации.** Основные положения диссертации доложены и одобрены на 3 IEEE Conference on Mechatronics (г. Будапешт, 2006 г.), XIV Международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» (г. Пенза, 2010 г.), IX Международной научно-технической конференции «Вибрационные машины и технологии» (г. Курск, 2010 г.), семинаре Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва, 2011 г.)

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы, включающего 60 наименований. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы основные положения исследований, дана оценка научной и практической значимости работы.

**В первой главе** проведен обзор работ по вопросам разработки и проектирования вибрационных роботов и роботов вертикального перемещения. В основе предложенной классификации вибророботов лежит способ создания периодической силы, действующей на корпус, а также размерность пространства, в которой движется мобильный объект. Деление роботов вертикального перемещения на группы основано на классификации системы приводов, которые осуществляют перемещение корпуса по поверхности. В главе представлен подробный анализ конструкций вибрационных роботов и роботов вертикального перемещения.

**Во второй главе** предложена расчетная схема вибрационного робота для движения по вертикальным ферромагнитным поверхностям.

Схема робота представлена на рис. 1.

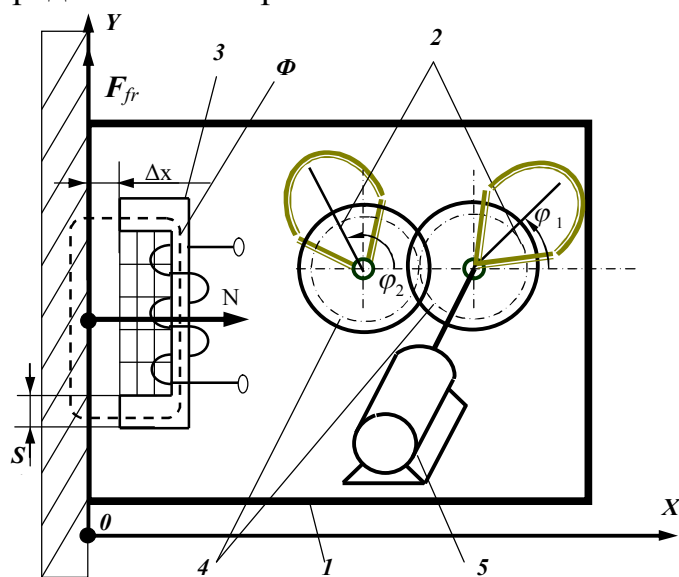


Рис. 1. Схема вибрационного робота: 1 – корпус; 2 – дебалансы; 3 – электромагнит; 4 – зубчатые колеса; 5 – управляемый электродвигатель постоянного тока.

Робот движется под действием инерционных сил, создаваемых при вращении дебалансов. Управление величиной силы трения осуществляется за счет изменения переменной силы прижатия корпуса, генерируемой электромагнитом.

Расчетная схема робота приведена на рис.2.

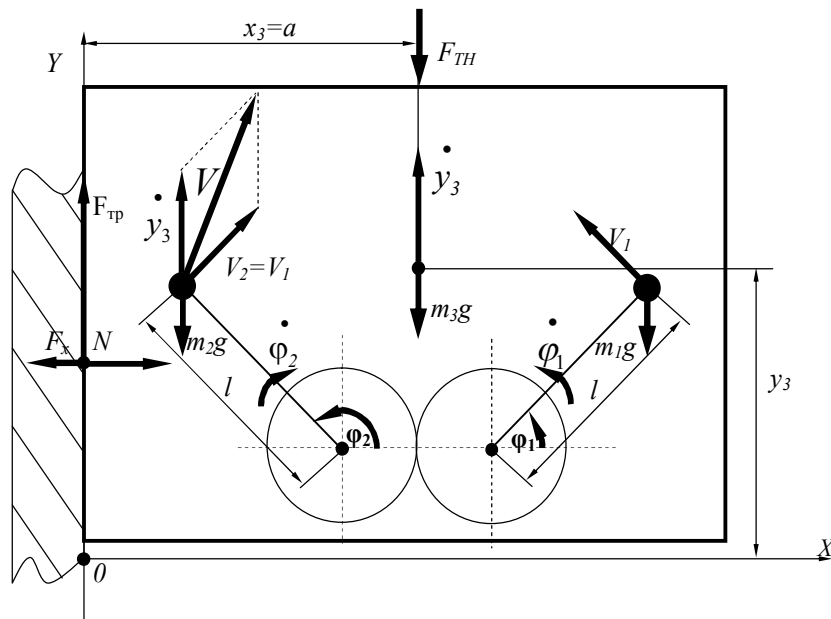


Рис 2. Расчетная схема вибрационного робота

$\varphi_1, \varphi_2$  – углы поворота дебалансов;  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  – угловые скорости вращения дебалансов;  $m_1 = m_2$  – массы дебалансов;  $V_1 = V_2$  – относительные скорости центра масс дебалансов;  $V$  – абсолютная скорость центра масс дебаланса;  $F_x$  – сила прижатия магнитом корпуса к поверхности;  $F_{TP}$  – сила трения;  $N$  – нормальная реакция поверхности;  $x_3, y_3$  – координаты центра масс корпуса;  $m_3$  – масса корпуса робота.

При составлении математической модели, описывающей движение системы, примем следующие допущения. Дебалансы будем считать материальными точками, расположенными в центре масс дебалансов, на расстоянии  $l$  от оси вращения. Массы дебалансов равны. Корпус робота рассматриваем как твердое тело, совершающее поступательное движение вдоль координаты  $OY$ . На механическую систему наложены связи:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \pi - \varphi_2 \\ N > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Для составления дифференциальных уравнений движения виброробота используется система уравнений Лагранжа – Максвелла.

В качестве обобщенных координат примем:  $y_3$  – положение центра масс корпуса робота;  $\varphi_1$  – угол поворота дебаланса;  $\dot{q}_1$  – ток, протекающий в цепи якоря двигателя;  $\dot{q}_2$  – ток, протекающий в цепи электромагнита.

Для дифференциального уравнения, описывающего движение по обобщенной координате  $y_3$  непотенциальной силой является сила трения, которая представлена кусочно-непрерывной моделью:

$$Q_{y_3} = F_{TP} = \begin{cases} -\kappa \cdot N; & \dot{y}_3 > 0; \\ \kappa \cdot N; & \dot{y}_3 < 0; \\ -F_{PD}; & \dot{y}_3 = 0, |F_{PD}| \leq \kappa_0 \cdot N; \\ -\kappa_0 \cdot N \cdot \text{sign}(F_{PD}); & \dot{y}_3 = 0, |F_{PD}| > \kappa_0 \cdot N. \end{cases} \quad (2)$$

где  $F_{pд}$  – проекция на ось  $Y$  равнодействующей всех сил, приложенных к конструкции робота, кроме силы сухого трения;  $\kappa$  – коэффициент трения скольжения;  $\kappa_0$  – коэффициент трения покоя;  $N$  – реакция опоры, равная силе, развиваемой электромагнитом.

Силу, действующую со стороны электромагнита, будем определять по формуле

$$F_x = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S z^2} \quad (3)$$

Тогда нормальную реакцию опоры представим в следующем виде:

$$N = F_x = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S z^2}. \quad (4)$$

Функции  $L$  (лагранжиан) и  $\psi$  (функция Релея), входящие в систему уравнений Лагранжа–Максвелла, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} L = & \frac{m_3 \dot{y}_3^2}{2} + m_l \left( \left( \dot{y}_3 \right)^2 + 2 \dot{y}_3 \left( \dot{\varphi}_l l \right) \cos(\varphi_l) + \left( \dot{\varphi}_l l \right)^2 \right) + \\ & + \frac{J_{я} \dot{\varphi}_l^2}{2} - m_3 g y_3 - 2 m_l g (y_3 + l \sin(\varphi_l)) + \\ & + \frac{\Phi^2 \Delta x}{2 \cdot \mu_0 S z^2} + \frac{L_{11} I_{я}^2}{2} + L_{12} I_{я} \dot{q}_c + \frac{L_{22} \dot{q}_c^2}{2}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\psi = \frac{\mu_{y3} \dot{y}_3^2}{2} + \frac{\mu_{\varphi l} \dot{\varphi}_l^2}{2} + \frac{R_M I_M^2}{2} + \frac{R_{я} I_{я}^2}{2}, \quad (6)$$

где  $L_{11}$  и  $L_{22}$  – коэффициенты самоиндукции соответственно подвижного и неподвижного контуров;  $L_{12}$  – коэффициент взаимной индукции контуров,  $J_{я}$  – момент инерции якоря двигателя;  $\dot{q}_c$  – ток в цепи статора;  $R_{я}$  – активное сопротивление якоря электромагнита;  $\mu_{y3}$ ,  $\mu_{\varphi l}$  – значение вязкости;  $R_M$  – активное сопротивление катушки электромагнита;  $\Phi$  – магнитный поток, возникающий в магнитном контуре электромагнита,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха,  $S$  – площадь воздушного зазора,  $z$  – число витков проводника с током,  $\Delta x$  – зазор между металлической поверхностью и электромагнитом.

Используя уравнения Лагранжа–Максвелла, получим систему дифференциальных уравнений, описывающих поведение электромеханической системы:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_l = \frac{-2 \ddot{y}_3 m_l l \cos(\varphi_l) - \mu_{\varphi_l} \dot{\varphi}_l - 2 m_l g l \cos(\varphi_l) + k_{\omega} I_{Я}}{2 \cdot m_l \cdot l^2 + J_{Я}}; \\ \ddot{y}_3 = \frac{-\mu_{y_3} \dot{y}_3 - 2 m_l \left( \ddot{\varphi}_l \right) l \cos(\varphi_l) - m_3 g - 2 m_l g + 2 m_l \left( \dot{\varphi}_l \right)^2 l \sin(\varphi_l) + F_{TP}}{(m_3 + 2 \cdot m_l)}; \\ \dot{\Phi} = U_M - R_M \frac{\Phi \Delta x}{\mu_0 S z^2}; \\ \dot{I}_{Я} = \frac{U_{Я} - R_{Я} I_{Я} - k_{\epsilon} \dot{\varphi}_l}{L_{Я}}. \end{cases} \quad (7)$$

Для дальнейшего анализа динамики виброробота система уравнений (7) была переписана в безразмерном виде. Для этого введены масштабы:  $y_0$  – масштаб длины;  $\varphi_0$  – масштаб угла поворота;  $U_0$  – масштаб электрического напряжения;  $I_0$  – масштаб электрического тока;  $\Phi_0$  – масштаб магнитного потока.

Безразмерное время будет иметь вид  $\tau = \omega t / 2\pi$ .

Безразмерные механические величины:

$$y_3 = y_0 \cdot \overline{y_3}; \dot{y}_3 = y_0 \cdot \dot{\overline{y_3}} \cdot \frac{\omega}{2\pi}; \ddot{y}_3 = y_0 \cdot \ddot{\overline{y_3}} \cdot \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2; \varphi_l = \varphi_0 \cdot \overline{\varphi_l}; \dot{\varphi}_l = \varphi_0 \cdot \dot{\overline{\varphi_l}} \cdot \frac{\omega}{2\pi}; \ddot{\varphi}_l = \varphi_0 \cdot \ddot{\overline{\varphi_l}} \cdot \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2; g = y_0 \cdot \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2$$

Безразмерные электрические величины:

$$U_M(\tau) = U_0 \cdot \overline{U_M}(\tau); U_{Я}(\tau) = U_0 \cdot \overline{U_{Я}}(\tau); \Phi(\tau) = \Phi_0 \cdot \overline{\Phi}(\tau); \dot{\Phi}(\tau) = \Phi_0 \cdot \dot{\overline{\Phi}}(\tau) \cdot \frac{\omega}{2\pi}; I_{Я}(\tau) = I_0 \cdot \overline{I_{Я}}(\tau); \dot{I}_{Я}(\tau) = I_0 \cdot \dot{\overline{I_{Я}}}(\tau) \cdot \frac{\omega}{2\pi}.$$

С учетом принятых обозначений система уравнений (7) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{\overline{\varphi}_l} = -\gamma_2 \cdot \ddot{\overline{y_3}} \cdot \cos(\varphi_0 \cdot \overline{\varphi_l}) - \gamma_3 \cdot \dot{\overline{\varphi}_l} - \gamma_4 \cdot \cos(\varphi_0 \cdot \overline{\varphi_l}) + \gamma_1 \overline{I_{Я}} \\ \ddot{\overline{y_3}} = -\chi_2 \cdot \dot{\overline{y_3}} - \chi_3 \cdot \ddot{\overline{\varphi}_l} \cdot \cos(\varphi_0 \cdot \overline{\varphi_l}) + \chi \cdot \left( \dot{\overline{\varphi}_l} \right)^2 \cdot \sin(\varphi_0 \cdot \overline{\varphi_l}) + \chi_4 \cdot \overline{F_{TP}} - I \\ \dot{\overline{\Phi}} = \theta \cdot \overline{U_M} - \theta_2 \cdot \overline{\Phi} \\ \dot{\overline{I_{Я}}} = \xi \cdot \overline{U_{Я}} - \xi_2 \cdot \overline{I_{Я}} - \xi_3 \cdot \dot{\overline{\varphi}_l} \end{cases} \quad (8)$$

Безразмерные параметры будут иметь следующий вид:

$$\gamma = \frac{I_0 k_{\omega}}{\varphi_0 \cdot \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2 (2m_l l^2 + J_{Я})}; \gamma_2 = \frac{2 \cdot m_l \cdot l \cdot y_0}{(2 \cdot m_l \cdot l^2 + J_{Я}) \cdot \varphi_0}; \gamma_3 = \frac{\mu_{\varphi_l}}{(2m_l l^2 + J_{Я}) \frac{\omega}{2\pi}}; \gamma_4 = \frac{2m_l \cdot g \cdot l}{\varphi_0 \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2 (2m_l l^2 + J_{Я})};$$

$$\chi = \frac{m_l l (\varphi_0)^2}{y_0 (m_3 + 2m_l)}; \chi_2 = \frac{\mu_{y_3}}{\frac{\omega}{2\pi} (m_3 + 2m_l)}; \chi_3 = \frac{2m_l l \varphi_0}{(m_3 + 2 \cdot m_l) y_0}; \chi_4 = \frac{I}{y_0 \cdot \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2 (m_3 + 2 \cdot m_l)};$$



$$\theta = \frac{U_0}{\Phi_0 \frac{\omega}{2\pi}}; \theta_2 = \frac{R_M \Delta x}{\frac{\omega}{2\pi} \mu_0 S z^2}; \xi = \frac{U_0}{\frac{\omega}{2\pi} I_0 L_J}; \xi_2 = \frac{R_J}{\frac{\omega}{2\pi} L_J}; \xi_3 = \frac{\Phi_0 k_\varepsilon}{I_0 L_J}.$$

Для получения решения системы дифференциальных уравнений (8) в работе применен численный метод интегрирования. В силу дискретности времени, вероятность выполнения условия  $(\dot{y}_3)_i = 0$ , при фиксированном  $\Delta\tau$ , крайне мала. Поэтому необходимо определять момент времени, при котором выполняется условие  $(\dot{y}_3)_i = 0$ . Для этого применяется алгоритм коррекции шага интегрирования. Идея алгоритма состоит в детектировании перехода скорости через ноль. Если  $\text{sign}((\dot{y}_3)_i \cdot ((\dot{y}_3)_i + \Delta\tau \cdot (\ddot{y}_3)_{i+1})) < 0$  – то, на текущем шаге интегрирования произошел переход скорости через ноль.

Следовательно, выполняется равенство:

$$(\dot{y}_3)_i + \Delta\tau_{adapt} \cdot (\ddot{y}_3)_{i+1} = 0. \quad (9)$$

Из выражения (9) можно определить  $\Delta\tau_{adapt}$  (адаптивный шаг интегрирования), при котором скорость станет равной нулю на следующем шаге интегрирования:

$$\Delta\tau_{adapt} = -(\dot{y}_3)_i / (\ddot{y}_3)_{i+1}. \quad (10)$$

Разработанный алгоритм позволяет адаптивно изменять шаг времени интегрирования, что повышает точность полученного решения и минимизирует время вычислительного эксперимента.

**В третьей главе,** исследуется движение мобильного робота при программном и параметрическом управлении методами математического моделирования.

При программном управлении на катушку электромагнита подается управляющее электрическое напряжение  $\overline{U_M}(\tau)$ , которое моделируется следующим образом:

$$\overline{U_M}(\tau) = \overline{U_{M1}} + \begin{cases} \overline{U_{M2}}, & \text{если } \sin(2\pi \cdot \tau + 2\pi \cdot \overline{\alpha}) > 0; \\ 0, & \text{если } \sin(2\pi \cdot \tau + 2\pi \cdot \overline{\alpha}) \leq 0, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\overline{U_{M1}}$  – постоянная составляющая напряжения питания электромагнита,  $\overline{U_{M2}}$  – амплитуда переменной составляющей напряжения питания электромагнита,  $\overline{\alpha}$  – разность между начальными фазами двух периодических величин: угла поворота инерционных масс и управляющего напряжения питания электромагнита.

Напряжение в цепи якоря двигателя имеет постоянную фиксированную величину  $\overline{U_J}(\tau) = \text{const}$ , напряжение в цепи якоря обеспечивает частоту вращения дебалансов, среднее значение которой определяется по формуле:  $\omega = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{\varphi}_1 d\tau$ .

При моделировании приняты значения безразмерных параметров робота:

$$k = 0,7; \omega = 25; \overline{U_J} = 47,5; \overline{U_{M1}} = 1; \overline{U_{M2}} = 12; \overline{\alpha} = 0,5.$$

Масштабы физических величин:

$$\varphi_0=1; y_0=1; U_0=1; I_0=1; \Phi_0=1.$$

Значения безразмерных комплексов:

$$\gamma = 234,615; \gamma_2 = 14,286; \gamma_3 = 1,436 \cdot 10^3; \gamma_4 = 8,843; \chi = 0,157; \chi_2 = 1,257 \cdot 10^{-4};$$

$$\chi_3 = 0,025; \chi_4 = 0,316; \theta = 0,251; \theta_2 = 60,319; \xi = 628,319; \xi_2 = 502,655; \xi_3 = 1,7 \cdot 10^3$$

Начальные условия для моделирования поведения электромеханической

$$\text{системы: } \ddot{y}_3 = 0; \dot{y}_3 = 0; \overline{y}_3 = 0; \ddot{\varphi}_1 = 0; \dot{\varphi}_1 = 0; \overline{\varphi}_1 = 0; \dot{\Phi} = 0; \overline{\Phi} = 0$$

Графики, представленные на рис. 3, иллюстрируют постепенный переход динамических режимов работы системы от устойчивого перемещения корпуса вверх до движения робота вниз.

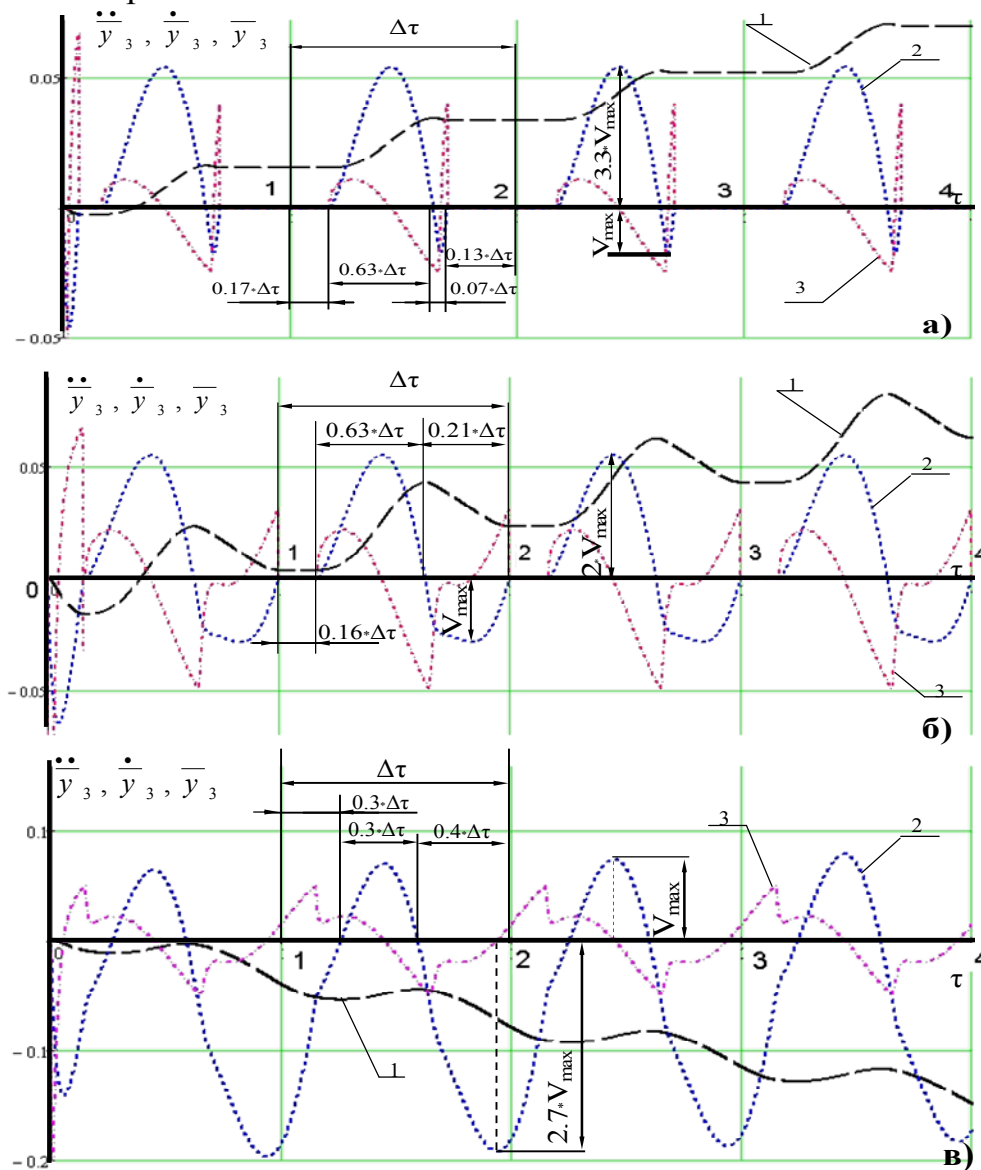


Рис. 3. Временные диаграммы характеристик движения корпуса: 1 – перемещение  $\overline{y}_3$ ; 2 – скорость  $0,5 \cdot \dot{y}_3$ ; 3 – ускорение  $0,02 \cdot \ddot{y}_3$  (а –  $\overline{\alpha} = 0,35$ ,  $\overline{U}_{M2} = 30$ ; б –  $\overline{\alpha} = 0,35$ ,  $\overline{U}_{M2} = 27$ ; в –  $\overline{\alpha} = 0,35$ ,  $\overline{U}_{M2} = 13$ )

Показанные режимы движения возникают в результате изменения управляемого параметра  $U_{M2}$ , который определяет величину силы трения, действующую на корпус. При высоких значениях  $U_{M2}$  система движется с периодическими остановками, без соскальзывания робота вниз. Цикл движения состоит из фазы поднятия корпуса, далее следует его остановка и цикл повторяется снова (см. рис. 3,а). Уменьшение величины  $\overline{U_{M2}}$  приводит к изменению режима движения и появлению в цикле движения фазы соскальзывания (см. рис. 3,б). Перемещение робота носит характер возвратно-поступательного движения с наличием положительной постоянной составляющей скорости. Поэтому средняя скорость виброробота за один цикл движения больше нуля, робот двигается вверх. Дальнейшее уменьшение величины  $\overline{U_{M2}}$  приводит к появлению режимов движения с отрицательной постоянной составляющей скорости (см. рис. 3,в), когда мобильный объект начинает двигаться вниз.

При режимах движения, показанных выше, поведение системы еще может корректироваться посредством других управляющих параметров (например,  $\overline{\alpha}$ ). Однако дальнейшее понижение величины  $\overline{U_{M2}}$  приводит к неконтролируемому падению мобильного объекта, вследствие того, что сила трения уже не может полностью скомпенсировать силу гравитации (рис. 4).

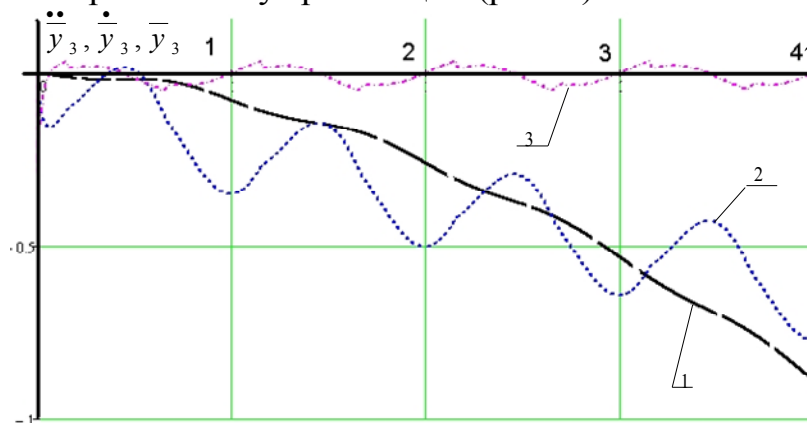


Рис. 4 Временная диаграмма характеристик движения корпуса: 1 – перемещение  $\overline{y_3}$ ; 2 – скорость  $0,5 \cdot \dot{\overline{y_3}}$ ; 3 – ускорение  $0,02 \cdot \ddot{\overline{y_3}}$  ( $\overline{\alpha} = 0,35$ ,  $\overline{U_{M2}} = 7$ )

Примеры поведения системы, показанные на рис. 3а и 3б характеризуются наличием остановок корпуса в процессе движения и быстрым переходом к установившемуся режиму работы. Однако изменение значения разности фаз  $\overline{\alpha}$  существенно меняет динамику движения объекта.

Увеличение разности фаз до  $\overline{\alpha} = 0,45$  приводит к появлению длительного переходного процесса (см. рис. 5), который может вызвать высокие динамические нагрузки на оборудование робота. Таким образом, если на роботе установлено оборудование и в системе присутствует подобный переходный процесс, необходима установка дополнительного устройства виброгашения, которое позволит минимизировать влияние перегрузок на аппаратуру.

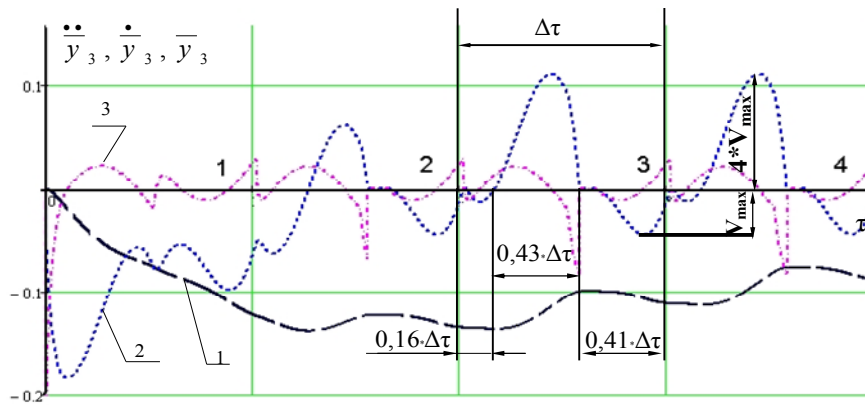


Рис. 5 Временная диаграмма характеристик движения корпуса: 1 – перемещение  $\overline{y}_3$ ; 2 – скорость  $0,5 \cdot \dot{y}_3$ ; 3 – ускорение  $0,02 \cdot \ddot{y}_3$  ( $\overline{\alpha} = 0,45$ ,  $\overline{U}_{M2} = 30$ )

Кроме получения временных характеристик перемещения робота было исследовано влияние управляемых и неуправляемых величин на среднюю скорость (рис. 6):

$$(\dot{y}_3)_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{y}_3 d\tau. \quad (12)$$

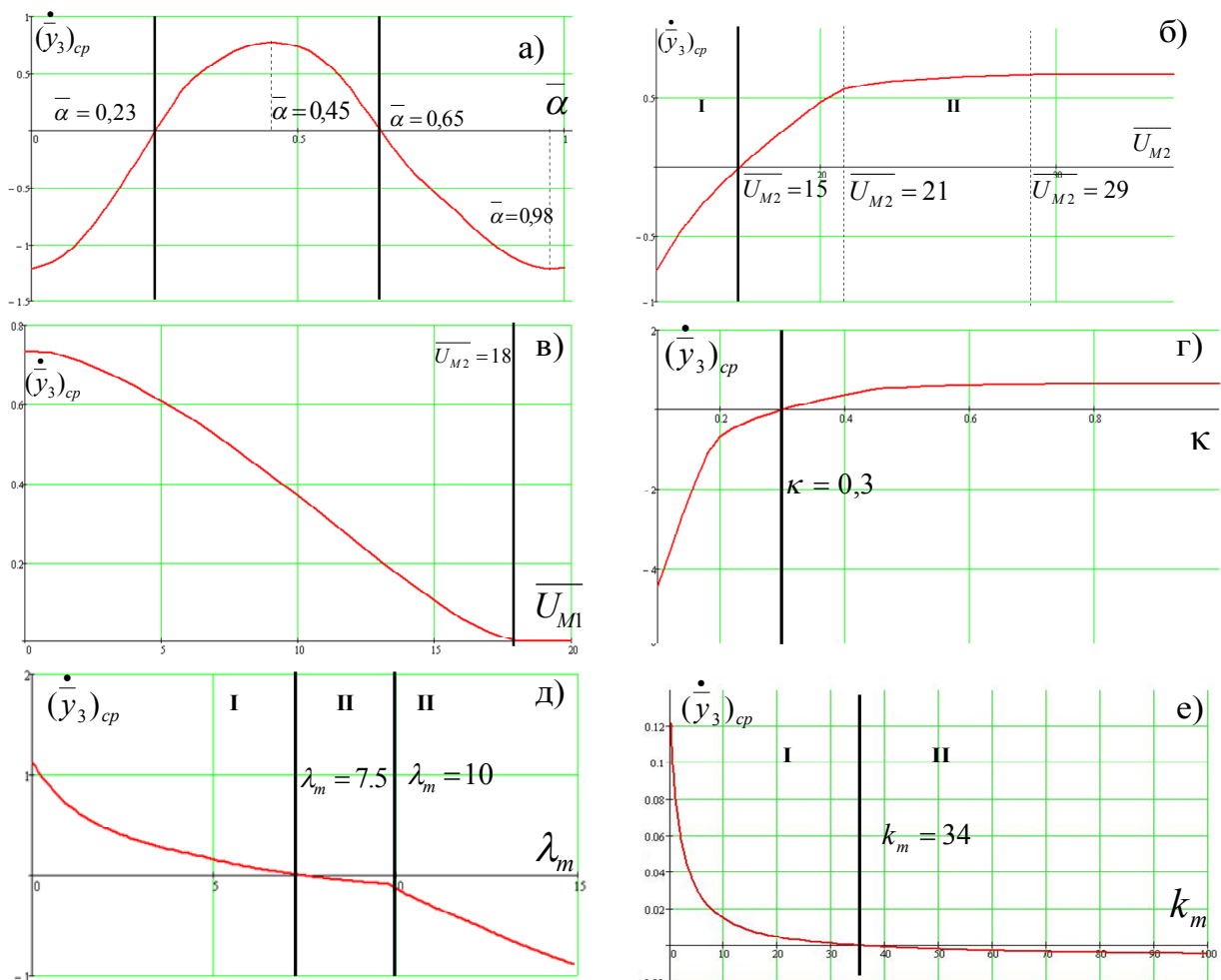


Рис. 6. Графики зависимости скорости вертикального перемещения от управляемых и неуправляемых параметров робота: а -  $\overline{\alpha}$ ; б -  $\overline{U}_{M2}$ ; в -  $\overline{U}_{M1}$ ; г -  $\kappa$ ; д -  $\lambda_m$ ; е -  $k_m$ .

Средняя скорость движения робота максимальна при разности фаз  $\bar{\alpha} = 0,45$  (см. рис. 6,а). Скорость движения робота вверх максимальна, когда трение корпуса о поверхность минимально, а вертикальная инерционная сила направлена вверх.

Минимальной вертикальной скорости соответствует разность фаз  $\bar{\alpha} = 0,98$ , при этом инерционная сила направлена вниз, а сила трения минимальна и не противодействует соскальзыванию корпуса робота

На графике, представленном на рис. 6,б, можно выделить 2 области: область положительных скоростей (II) и область отрицательных скоростей (I). При  $\bar{U}_{M2} < 15$  средняя скорость движения виброробота имеет отрицательное значение. В интервале  $15 < \bar{U}_{M2} < 29$ ,  $(\dot{y}_3)_{cp}$  принимает положительные значения и увеличивается при росте  $\bar{U}_{M2}$ , характеристика имеет излом при  $\bar{U}_{M2} = 21$ . С ростом амплитуды напряжения мы попадаем в зону, в которой увеличение напряжения уже не приводит к увеличению скорости. При напряжении  $\bar{U}_{M2} > 29$ , средняя скорость робота не изменяется.

Исследования показали, что максимальная скорость достигается при нулевом значении  $\bar{U}_{M1}$  (см. рис. 6,в). При увеличении  $\bar{U}_{M1}$  наблюдается уменьшение  $(\dot{y}_3)_{cp}$ , что является следствием увеличения постоянной составляющей в тяговом усилии электромагнита, которое приводит к появлению дополнительной силы трения.

Дополнительно исследовалось влияние неуправляемых величин на среднюю скорость. Такими параметрами являются коэффициент трения -  $k$  и соотношения масс корпуса и одного дебаланса -  $k_m$ .

При  $k < 0,3$  (рис. 6,г) средняя скорость лежит в отрицательном диапазоне скоростей. Сила трения, зависящая от  $k$ , не может скомпенсировать силу тяжести. При  $k > 0,3$  сила трения уже больше силы тяжести, поэтому происходит движение вверх. Но при значении  $k > 0,6$  рост скорости прекращается, т.к. сила трения уже полностью компенсирует силу тяжести и дальнейшее увеличение  $k$  не приведет к существенному увеличению средней скорости.

Для изучения влияния весовых характеристик робота введем параметр определяющий соотношение массы дебалансов к массе корпуса:  $k_m = \frac{m_3}{m_1}$ . При этом

будем считать, что суммарная масса робота остается постоянной:

$$m_1 + k_m m_3 = m = const. \quad (13)$$

При малых значениях  $k_m$  средняя скорость устройства максимальна (см. рис. 6,е), вес корпуса робота мал по сравнению с массой дебалансов. Дальнейшее увеличение  $k_m$  ведет к падению скорости движения, из-за роста веса корпуса мобильного объекта. При  $k_m = 34$  сила тяжести, действующая на робота, становится равной инерционному усилию дебалансов и робот начинает колебаться на вертикальной поверхности относительно одной точки. При  $k_m > 34$  скорость робота становится отрицательной.

Теперь зафиксируем массу дебаланса и будем изменять массу корпуса  $m_3$ . Такое условие предполагает увеличение суммарной массы корпуса, то есть:

$$m_1 + \lambda_m m_3 = m \neq const. \quad (14)$$

При значениях  $\lambda_m$ , близких к нулю, скорость принимает максимальное значение, вес корпуса незначителен по сравнению с массой дебалансов рис. 6,д. Дальнейшее увеличение  $\lambda_m$  ведет к падению скорости движения из-за роста веса корпуса мобильного объекта. При  $\lambda_m = 7,5$  суммарный вес робота становится равным инерционному усилию дебалансов и робот совершает колебательное движение на вертикальной поверхности относительно одной точки. При значениях  $\lambda_m > 10$  происходит резкое уменьшение скорости. Это связано с тем, что сила трения, создаваемая силой электромагнита, становится меньше гравитационной силы и виброробот начинает двигаться вниз.

Однако при временном программном управлении отсутствует контроль частоты вращения дебаланса, угла поворота дебаланса и разности фаз  $\bar{\alpha}$ . Изменение этих параметров может существенно влиять на характер движения робота, управляющее напряжение, поступающее на электромагнит, зависит от этих параметров.

Поэтому была предложено параметрическое управление движением робота с нелинейным логическим алгоритмом управления (см. рис.7).

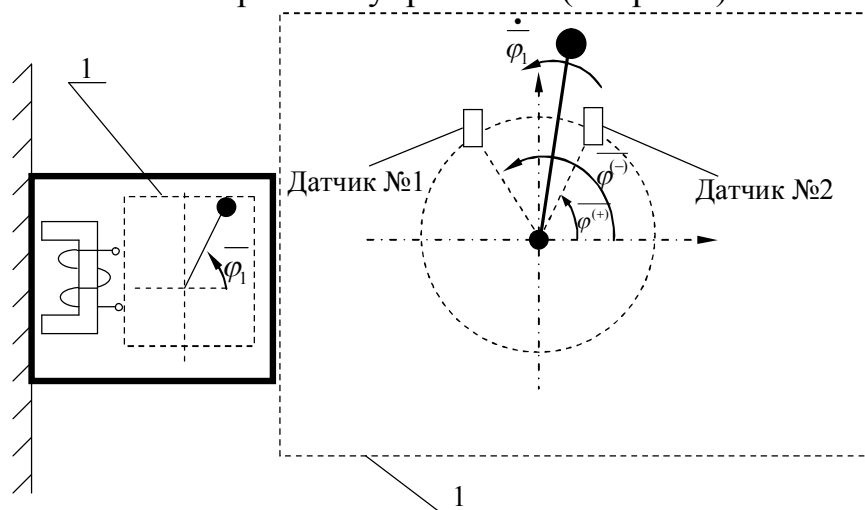


Рис. 7. Принципиальная схема работы параметрической САУ

На корпусе двигателя располагаются 2 датчика. Положению сенсоров соответствуют углы поворота кривошипа  $\bar{\varphi}^{(+)}$  и  $\bar{\varphi}^{(-)}$ . При прохождении валом угла  $\bar{\varphi}^{(+)}$  управляющее устройство производит команду подать минимальное напряжение на электромагнит, проекция инерционной силы направлена вверх и необходимо минимизировать силу трения, противодействующую движению. При прохождении угла  $\bar{\varphi}^{(-)}$  САУ вновь подает максимальное напряжение на электромагнит и этим не позволяет корпусу робота упасть вниз.

Напряжение  $\bar{U}_M(\varphi_1)$ , подаваемое на катушку электромагнита, моделируется следующим образом:

$$\overline{U}_M(\varphi_1) = \overline{U}_{M1} + \begin{cases} \overline{U}_{M2} & \text{если } \varphi^{(-)} > \overline{\alpha} > \varphi^{(+)} \\ 0 & \text{если } \varphi^{(+)} \leq \overline{\alpha} \leq \varphi^{(-)} \end{cases} \quad (15)$$

Для моделирования движения выбраны следующие значения параметров электромеханической системы:

$$k = 0,7; \omega = 25; \overline{U}_\gamma = 38,215; \overline{U}_{M1} = 1; \overline{U}_{M2} = 19; \overline{\alpha} = 0,5; \overline{\varphi}^{(-)} = 0,5; \overline{\varphi}^{(+)} = 0.$$

Значения безразмерных комплексов:

$$\gamma = 15,84; \gamma_2 = 4,938; \gamma_3 = 77,57; \gamma_4 = 4,776; \chi = 0,83; \chi_2 = 10^{-4}; \chi_3 = 0,13; \chi_4 = 0,33; \\ \theta = 0,314; \theta_2 = 75,4; \xi = 78,5; \xi_2 = 62,8; \xi_3 = 170$$

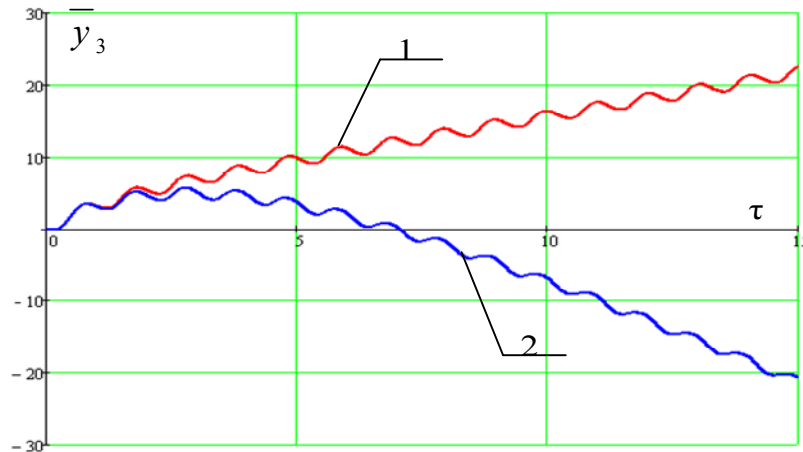


Рис. 8. Графики перемещения корпуса робота по вертикальной поверхности: 1 – параметрическое управление; 2 – программное управление

Как видно из графиков, показанных на рис. 8, при заданных безразмерных параметрах системы программное управление не обеспечивает движение робота вверх, а параметрическое управление, напротив, позволяет роботу устойчиво двигаться.

Для предложенной параметрической САУ параметрами определяющими режимы работы системы, являются углы  $\overline{\varphi}^{(-)}$  и  $\overline{\varphi}^{(+)}$ , при которых происходит включение-выключение электромагнита.

При зафиксированном угле выключения электромагнита  $\overline{\varphi}^{(-)} = 0,5$  и переменном угле включения  $\overline{\varphi}^{(+)}$  характеристика средней скорости в зависимости от  $\overline{\varphi}^{(+)}$  будет иметь вид, показанный на рис. 9. Исследование влияния углов включения-выключения проводилось для режима движения без соскальзывания.

Из рис. 9 видно, что увеличение угла поворота вала двигателя, при котором происходит отключение электромагнита, приводит к уменьшению средней скорости корпуса. Такая закономерность обусловлена тем, что увеличение угла выключения электромагнита  $\overline{\varphi}^{(+)}$  приводит к уменьшению сектора окружности, при попадании в который сила трения не противодействует движению вверх.

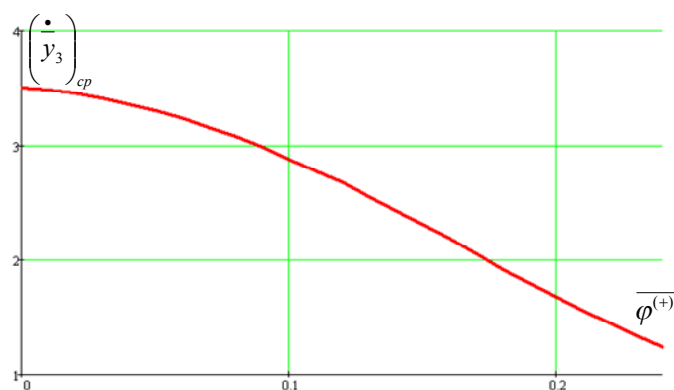


Рис. 9. График зависимости скорости вертикального перемещения от угла выключения электромагнита  $\overline{\varphi^{(+)}}$

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований. Проведен ряд экспериментов с целью исследования процессов движения корпуса при различных режимах включения - выключения электромагнита и режимах работы двигателя. Основной задачей экспериментального исследования являлось подтверждение принципиальной возможности осуществления предложенного способа движения.

Для решения данной задачи был спроектирован и изготовлен макет прототипа робота, позволяющий провести его исследование, как при временном программном управлении, так и при параметрическом управлении.

Для управления включением – выключением электромагнита была разработана электронная управляющая схема (рис. 10).

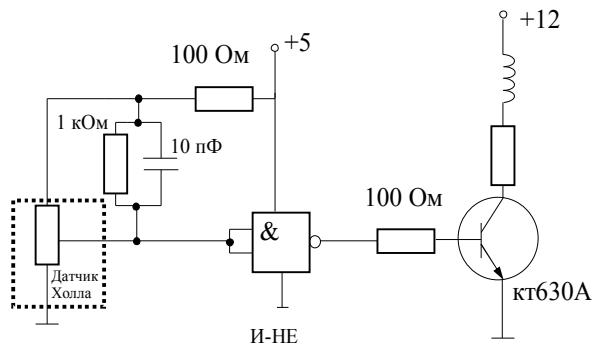


Рис. 10 Электронная управляющая схема

Масса корпуса прототипа 0,19 кг, масса дебалансных инерционных масс 0,04 кг. Габаритные размеры 120x43x30.

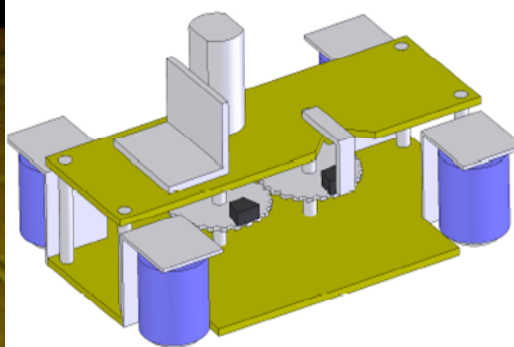
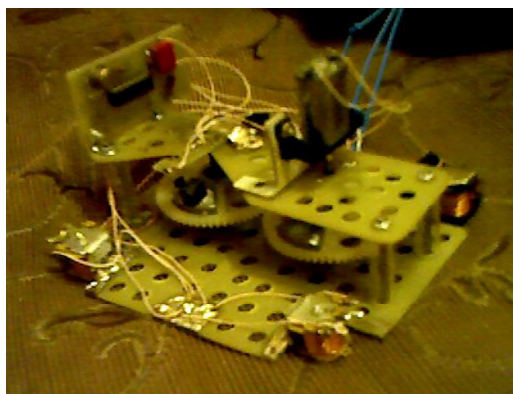


Рис. 11 Фотография и 3D модель макета вибрационного робота.



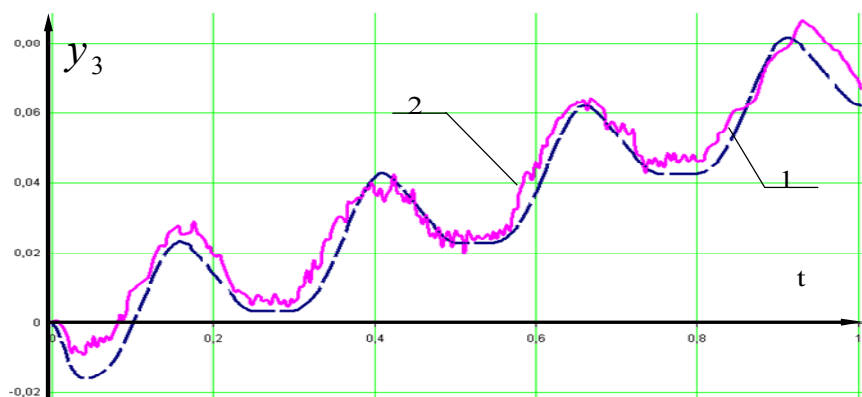


Рис. 12. Графики движения корпуса: 1 – расчетное перемещение; 2 – экспериментальное перемещение.

При моделировании движения робота посредством решения полученных дифференциальных уравнений были определены параметры макета вибрационного робота.

Сравнение данных, полученных в результате вычисленного эксперимента и натурных испытаний (рис. 12), показывает сопоставимость созданной математической модели и реального прототипа робота. Данные эксперимента подтверждают присутствие периодических процессов во время движения мобильного объекта.

Прототип вибрационного робота для движения по вертикальным ферромагнитным поверхностям используется в качестве учебного стенда для проведения лабораторных и исследовательских работ студентами специальности «Мехатроника» по дисциплинам «Электромеханические и мехатронные системы» и «Теория автоматического управления».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан гибридный способ перемещения, сочетающий в себе применение двухвального дебалансного вибровозбудителя и управляемого электромагнита, позволяющего удерживать корпус робота на вертикальной ферромагнитной поверхности.

2. Разработан оригинальный алгоритм численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику движения вибрационного робота и учитывающих силу трения покоя, действующую на корпус робота. Предложенный алгоритм отличается тем, что определяет переход скорости корпуса через нуль и корректирует шаг интегрирования, обеспечивая точное определение момента остановки корпуса.

3. Выявлено, что средняя скорость движения зависит от разности фаз между периодическими величинами – углом поворота инерционных масс и управляющим напряжением питания электромагнита. Существует максимум средней скорости, соответствующий величине разности фаз 0,45 (безразмерных единиц), и минимум – 0,95 (безразмерных единиц).

4. Определено, что при временном программном управлении увеличение значения переменной составляющей напряжения питания электромагнита приводит к росту средней скорости. При этом существует граничное значение переменной

составляющей напряжения питания электромагнита, при превышении которого средняя скорость корпуса перестает увеличиваться.

5. Определено, что использование параметрической системы управления позволяет получать стабильное движение корпуса робота вверх, даже при значительных отклонениях скорости вращения двигателя от требуемых величин, что невозможно при программном временном управлении.

6. Установлена связь между значениями углов включения–выключения электромагнита для логической параметрической системы управления и средней скоростью движения. Выявлено, что уменьшение угла сектора, при нахождении кривошипа в котором на электромагнит подается минимальное напряжение, ведет к снижению средней скорости движения.

7. Создан макет прототипа робота, использующего для своего перемещения инерционные силы внутренних подвижных масс и управляемый электромагнит, способного перемещаться по вертикальным ферромагнитным поверхностям. Отличительной особенностью разработанного стенда является возможность изменения различных параметров робота, что обеспечивается оригинальной конструкцией. Экспериментальные исследования движения позволили определить достаточную степень соответствия математической модели реальному мобильному роботу

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации**

1. Сапронов, К.А. Исследование движения мобильной двухмассовой вибрационной системы [Текст] / К.А. Сапронов, **А.А. Черепанов**, С.Ф. Яцун // Изв. РАН. Серия «Теория и системы управления». 2010. № 1. С.147–155.

2. Виброробот для вертикального движения по металлической шероховатой поверхности [Текст] / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, **А.А. Черепанов**, [и др.] // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2010. Т. 12, № 4 (3). С. 651–655.

3. Мобильный вибрационный робот для движения по стенам [Текст] / С.Ф. Яцун, **А.А. Черепанов**, И. В. Лупехина [и др.] // Изв. вузов Северо-Кавказский регион. 2010. № 3. С. 3–8.

4. Яцун, С.Ф. Вибрационный мобильный робот для движения по вертикальной ферромагнитной стене [Текст] / С.Ф. Яцун, **А.А. Черепанов**// Естественные и технические науки, М. 2010. №6(50). С. 400–401.

**Другие публикации:**

5. Automatically controlled vibration-driven robots [Text] / N.N. Bolotnik, S.F. Jatsun, **A.A. Cherepanov** [и др.] // 3 IEEE Conference on Mechatronics, Budapest. 2006. P. 43 – 47.

6. Яцун, С.Ф. Моделирование вибрационного движения в сыпучей среде [Текст] / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, **А.А. Черепанов** // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2.ч. Курск, 2010. Ч.1. С. 18–23.

7. Яцун, С.Ф. Исследование влияния параметров виброробота на его среднюю скорость при движении по вертикальной ферромагнитной поверхности [Текст] / С.Ф. Яцун, **А.А. Черепанов** // XIV Междунар. науч.-техн. конф. «Информационно-

вычислительные технологии и их приложения» : сб. науч. ст.: в 2. ч. Пенза, 2010, С. 135–138.

8. Пат. 97979 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> В 62 D 57/00. Транспортное устройство для вертикальных перемещений [текст] / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Черепанов А.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ЮЗГУ. №2010106500/22; заявл. 24.02.2010; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27.

9. Пат. 101000 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 62 D 57/02. Транспортное устройство для движения в сыпучих средах [текст] / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Черепанов А.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ЮЗГУ. №2010135541/11; заявл. 24.08.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

10. Пат. 101683 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> В 62 D 57/04. Транспортное устройство для движения по вертикальным металлическим поверхностям [текст] / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Черепанов А.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ЮЗГУ. №2010140051/11; заявл. 29.09.2010; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3.

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Формат 60x84 1/16

Печ. Л. 1,0. Тираж 110 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул 50 лет Октября, 94.

Отпечатано в ЮЗГУ.