

2. Для расчетов элементов передней подвески автомобиля с АБС учесть дополнительно режим экстренного торможения при этом применять современные методы расчета на прочность, например, метод конечных элементов, который позволяет адекватно, точно и без привлечения дополнительных затрат производить прочностной расчет.

Снижение действующих нагрузок в элементах подвески и повышение её долговечности возможно при реализации следующих путей.

1. Конструктивное обеспечение податливости рамных шарнирных опор направляющих элементов подвески, например, путем реализации трехопорной продольно-податливой подвески [1].

2. При проектировании подвески исключить попадание собственной частоты подвески в зоны резонанса, которые обусловлены рабочим процессом затормаживания колеса с АБС.

3. Обеспечить повышенное демпфирование подвески в продольном направлении для легкового автомобиля не ниже 4000...5000 кг/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревин А. А., Чернышов К. В. Динамическое нагружение элементов подвески автомобиля с АБС при торможении.
2. Ревин А. А., Балакина Е. В. Повышение надежности подвески, нагруженной продольными циклическими силами.

621.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИБРОРОБОТА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ*

Д-р техн. наук, проф. С. Ф. ЯЦУН, студ. А. В. РАЗИНЬКОВА, асп. А. Н. ГРАНКИН

Предлагается конструкция мобильного вибрационного робота с электромагнитным приводом, проводится математическое моделирование движения робота и исследуются его законы.

The model of the mobile vibration robot with an emdrive is observed. Authors made mathematical simulation of the robot movement and examined its principles.

Мобильные роботы широко применяются для выполнения операций, которые опасны для жизни и здоровья человека. Они используются, например, для работы в небезопасных химических средах, в трубах, мониторинга окружающей среды, а также внутренних органов человека.

Одним из активно развивающихся направлений в механике является изучение и совершенствование различных способов движения. В настоящее время наибольшее распространение получили мобильные роботы, использующие традиционные способы движения с применением дополнительных устройств (колес, гусениц и т.п.). Однако такие роботы не могут перемещаться по узким трубам и двигаться в плотных средах, таких как жидкости. Поэтому необходима разработка нетрадиционных способов движения мобильных роботов [1—8]. Нами рассматривается вибрационный мобильный робот. Такие роботы могут передвигаться в сыпучих и плотных средах без колес, гусениц или ног, что

* Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 05-08-33382).

особенно важно при миниатюрном исполнении роботов. Исследованию подобных систем посвящены работы [9—11], однако движение робота рассматривается без учета привода, вызывающего движение внутренней массы.

Целью данной работы — исследование движения виброробота с учетом характеристик электромагнитного привода. При этом решаются следующие задачи: выбор схемы виброробота, построение математической модели системы, численное моделирование движения робота и определение основных зависимостей между характеристиками движения робота и параметрами системы.

Вибрационный робот представляет собой мехатронную систему, состоящую из механической, электрической и электронной частей. Схема его показана на рис. 1. Виброробот состоит из платформы 1, на которой установлен корпус 2. Внутри корпуса 2 неподвижно расположена обмотка электромагнита 3. Внутренняя масса (якорь) 5 подвешена на упругих элементах 4, которые являются направляющими для якоря и закреплены на корпусе 2. Амплитуда перемещения якоря 5 ограничена пружиной 6, установленной в сердечнике электромагнита 3. Робот перемещается по шероховатой поверхности 7.

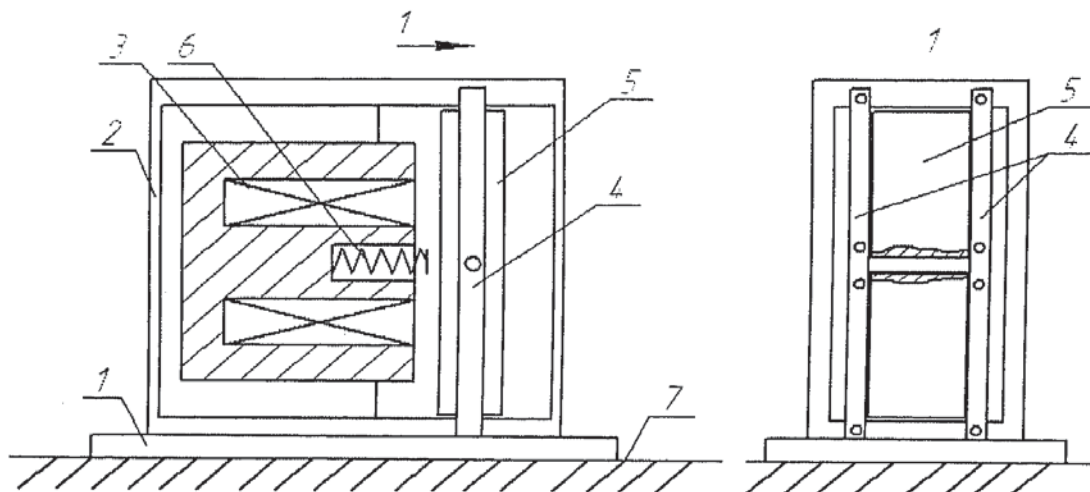


Рис. 1. Схема виброробота

При подаче периодического напряжения на обмотку электромагнита 3 возникает электромагнитная сила, под действием которой якорь 5 совершает колебательное движение. При контакте якоря с пружиной-ограничителем 6 происходит удар. В результате удара возникает сила инерции, большая по модулю, чем сила трения платформы 1 по поверхности 7, и корпус устройства совершает движение на один шаг. Таким образом, робот совершает пошаговое прямолинейное движение в одну сторону.

Расчетная схема и математическая модель. Для моделирования движения робота рассмотрим расчетную схему, представленную на рис. 2, где приняты следующие обозначения: m — масса якоря, M — масса робота, c — жесткость пружины, Δ — первоначальный зазор между магнитом и якорем, x_1 — координата якоря относительно неподвижной системы координат XOY , x_2 — координата робота относительно неподвижной системы координат XOY , $F_{эм}$ — электромагнитная сила, возникающая при подаче напряжения на магнит, N — сила нормальной реакции, $F_{тр}$ — сила сухого трения корпуса робота по поверхности.

Будем рассматривать прямолинейное движение робота по горизонтальной поверхности. За обобщенные координаты приняты перемещение якоря x_1 и перемещение корпуса робота x_2 .

На корпус робота действует внешняя сила — сила сухого трения $F_{тр}$. В качестве мо-

дели сухого трения принята модель, описанная в [12]. На графике, приведенном на рис. 3, представлена зависимость силы трения от скорости.

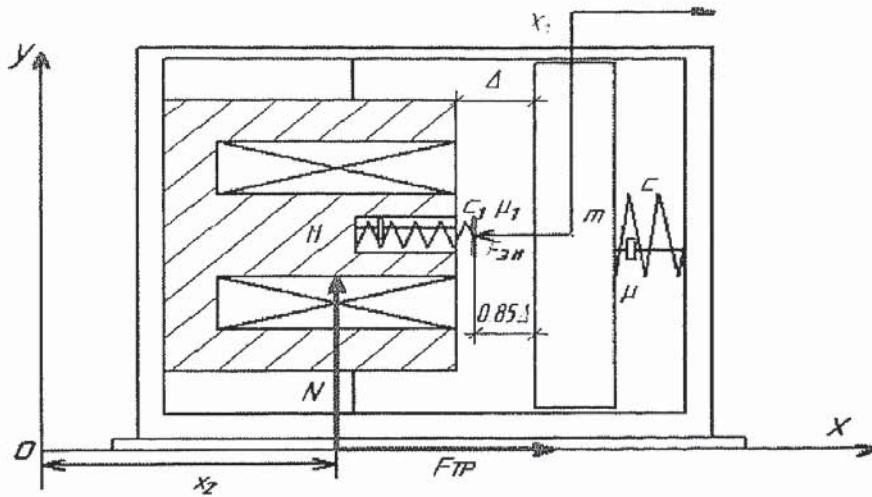


Рис. 2. Расчетная схема виброробота

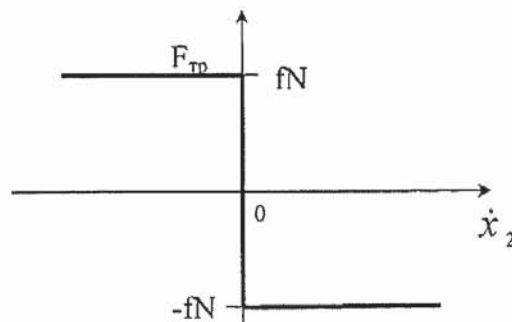


Рис. 3. Модель силы трения

Данную модель аналитически можно представить в виде

$$F_{тр} = \begin{cases} -fN \text{sign}(\dot{x}_2), & \text{если } \dot{x}_2 \neq 0 \\ -F_0, & \text{если } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } |F_0| \leq kN \\ -fN \text{sign}(F_0), & \text{если } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } |F_0| > kN \end{cases} \quad (1)$$

где F_0 — равнодействующая всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к корпусу; N — нормальная составляющая силы, действующая на корпус со стороны плоскости опоры (сила нормального давления); f — коэффициент сухого трения, $\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt}$ — скорость робота.

Для рассматриваемой системы $F_0 = \Phi_n$ и $N = Mg$.

При ускоренном движении якоря возникает сила инерции Φ_n , модуль которой равен: $\Phi_n = m\ddot{x}_1$.

К внутренним силам, действующим в рассматриваемой системе, относятся сила упругости $F_{упр}$ и сила вязкого сопротивления $F_{всопр}$ [13, 14]. Сила упругости в данной системе нелинейна (кусочно-линейна). Она описывается моделью, которая позволяет представить зависимость силы упругости от относительного перемещения якоря магнита в виде графика, представленного на рис. 4:

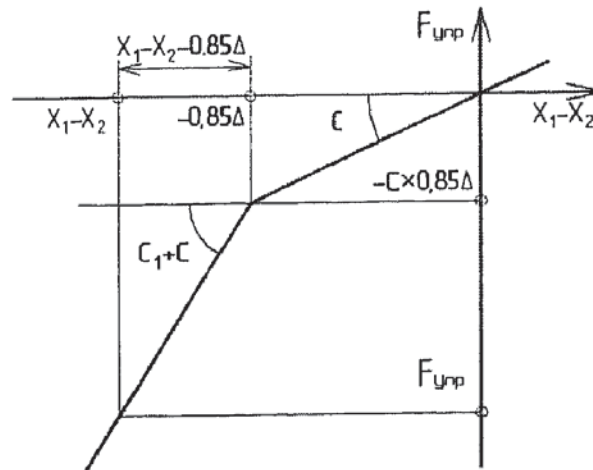


Рис. 4. Модель силы упругости

При относительном перемещении якоря, большем, чем $-0,85\Delta$, коэффициент жесткости равен C . Если же относительное перемещение якоря меньше $-0,85\Delta$, то коэффициент жесткости равен сумме C и C_1 .

Таким образом, модель сил упругости и вязкого сопротивления аналитически можно представить в следующем виде:

$$F_{\text{упр}} = \begin{cases} C(x_1 - x_2), & (x_1 - x_2) > -0,85\Delta, \\ C(x_1 - x_2) + C_1(x_1 - x_2 - 0,85\Delta), & (x_1 - x_2) < -0,85\Delta \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{\text{всопр}} = \begin{cases} \mu(\dot{x}_1 - \dot{x}_2), & (x_1 - x_2) > -0,85\Delta \\ (\mu + \mu_1) \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2), & (x_1 - x_2) < -0,85\Delta \end{cases} \quad (3)$$

При подаче напряжения на магнит возникает электромагнитная сила, притягивающая якорь, она определяется по формуле [13]

$$F_{\text{эм}} = \frac{\Phi_1^2}{\mu_0 Z^2 S}, \quad (4)$$

где Φ_1 — магнитный поток; Z — число витков катушки, S — площадь воздушного зазора, μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Дифференциальные уравнения, описывающие движение системы, имеют вид

$$\begin{cases} M\ddot{x}_2 = \Phi_{11} + F_{\text{тр}} \\ m\ddot{x}_1 + F_{\text{всопр}} + F_{\text{упр}} = F_{\text{эм}} \\ \dot{\Phi}_1 + i_1 R = U_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

а с учетом (1—4)

$$\begin{cases} M\ddot{x}_2 = -m\ddot{x}_1 + \begin{cases} -fN\text{sign}(\dot{x}_2), & \text{если } \dot{x}_2 \neq 0 \\ -F_0, & \text{если } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } |F_0| \leq kN \\ -fN\text{sign}(F_0), & \text{если } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } |F_0| > kN \end{cases} \\ m\ddot{x}_1 = \frac{\Phi_1^2}{\mu_0 Z^2 S} - \begin{cases} C(x_1 - x_2) + \mu(\dot{x}_1 - \dot{x}_2), & (x_1 - x_2) > -0,85\Delta, \\ C(x_1 - x_2) + C_1(x_1 - x_2 - 0,85\Delta) + (\mu + \mu_1)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2), & (x_1 - x_2) < -0,85\Delta \end{cases} \\ \dot{\Phi}_1 = U_1(t) - i_1 R \end{cases} \quad (6)$$

Алгоритм моделирования. Рассмотрим движение системы при условии, что функция напряжения $U_1(t)$ задана в виде

$$U_1 = \begin{cases} U_0 \sin(\omega t), & \text{если } \sin(\omega t) > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (7)$$

где U_0 , ω — амплитуда и частота подаваемого напряжения.

Начальные условия нулевые, т. е. при $t = 0$ $\dot{x}_1 = 0$, $x_1 = 0$, $\dot{x}_2 = 0$, $x_2 = 0$.

Точное решение системы дифференциальных уравнений (6) в аналитическом виде не представляется возможным, так как в каждом из уравнений системы имеются нелинейные слагаемые. Поэтому воспользуемся численными методами решения дифференциальных уравнений. Производные функций $F_{\text{упр}}(x_1 - x_2)$, $F_{\text{сопр}}(x_1 - x_2)$ имеют точку разрыва при $x_1 - x_2 = -0,85\Delta$, а $F_{\text{тр}}(\dot{x}_2)$ имеет разрыв в точке $\dot{x}_2 = 0$, поэтому для решения системы уравнений (6) необходимо использовать сложный алгоритм, позволяющий достаточно точно определить точки разрыва. Так как стандартные программы интегрирования дифференциальных уравнений в пакетах Mathcad, Matlab используют встроенные численные процедуры, то интегрирование уравнений системы (6) в этих пакетах сложно. В связи с этим для реализации алгоритма интегрирования (рис. 6) применяется специальная программа.

В этой программе используется численный метод, основанный на разложении искомой функции в ряд Тейлора. В этом методе искомая функция представляется в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i,j+1} &= \dot{x}_{0i,j} + \ddot{x}_{i,j} \Delta t \\ x_{i,j+1} &= x_{0i,j} + \dot{x}_{i,j} \Delta t + \ddot{x}_{i,j} \frac{\Delta t^2}{2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где Δt — адаптивный шаг по времени, уменьшающийся при приближении к точке разрыва, j — номер шага по времени, $i = 1, 2$.

Используя этот метод, на первом шаге интегрирования по заданным начальным условиям находят значения ускорений \ddot{x}_1 и \ddot{x}_2 по формулам из (6), затем определяют значения скоростей и перемещений на этом шаге по (8). На следующем шаге время увеличивается на Δt и, используя предыдущие значения ускорений, скоростей и перемещений, вычисляются действующие силы, значения которых подставляют в уравнения (6) для нахождения ускорений на новом шаге интегрирования. Этот цикл повторяется на протяжении всего времени интегрирования, при приближении к точкам разрыва шаг по времени уменьшается для более точных расчетов.

При численном интегрировании (6) использовалась дискретная модель силы трения. Основное отличие этой модели от классической в том, что в ней точка переключения одного уровня силы трения на другой (в кулоновской модели сухого трения) заменяется зоной переключения с интервалом $(-\delta; +\delta)$, где δ — малое значение скорости, не равное нулю. Введение этого интервала позволяет гарантированно зафиксировать момент переключения силы трения (с плюса на минус или наоборот). Таким образом, дискретная модель сухого трения будет иметь вид

$$F_{\text{тр}} = \begin{cases} -fN \text{sign}(\dot{x}_2), & \text{если } \dot{x}_2 > \delta \text{ или } \dot{x}_2 < -\delta \\ -F_0, & \text{если } \dot{x}_2 < |\delta| \text{ и } |F_0| \leq kN \\ -fN \text{sign}(F_0), & \text{если } \dot{x}_2 < |\delta| \text{ и } |F_0| > kN \end{cases} \quad (9)$$

Когда скорость попадает в интервал $(-\delta; +\delta)$, движение тела прекращается, и сила трения определяется из условия равновесия тела. В интервале $(-\delta; +\delta)$ скорость принудительно обнуляется. На рис. 5 условия (9) представлены графически.

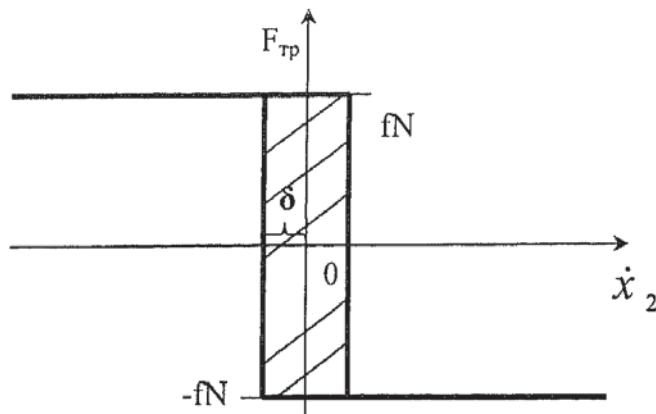


Рис. 5. Дискретная модель сухого трения

Движение робота происходит по следующему принципу. В начальный момент времени скорость корпуса робота равна нулю, при этом сила трения, действующая на тело, находится в интервале $(fN \dots -fN)$ и равна равнодействующей всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к корпусу, F_0 , в нашем случае $F_{тр} = -\Phi_{II}$. Когда сила инерции становится больше по модулю, чем значение силы трения при движении, тело приобретает ускорение, равное

$$\ddot{x}_2 = \left\{ \Phi_{II} + \begin{cases} -fN \operatorname{sign}(\Phi_{II}), & -\delta < \dot{x}_2 < \delta, \\ -fN \operatorname{sign}(\dot{x}_2), & -\delta > \dot{x}_2 \text{ или } \dot{x}_2 > \delta, \end{cases} \right\} \frac{1}{M}. \quad (10)$$

Перемещение робота происходит за счет несимметричной силы трения, возникающей из-за несимметричного закона перемещения $x_2 - x_1$. Пока сила инерции больше по модулю, чем сила трения, тело движется в направлении силы инерции. Если сила инерции становится меньше, чем сила трения, скорость тела начинает уменьшаться за счет отрицательного ускорения, получаемого по (10). В момент, когда скорость робота становится равной нулю (входит в интервал $(-\delta; +\delta)$), сила трения становится равной равнодействующей всех сил сумме F_0 , в данном случае силе инерции Φ_{II} и по (10) ускорение становится равным нулю. Таким образом происходит остановка робота. Далее робот начинает движение только при выполнении условия $\Phi_{II} > F_{тр}$.

Алгоритм интегрирования представлен на рис. 6. На первом шаге интегрирования происходит расчет электромагнитных сил, затем по формуле из (6) вычисляется ускорение якоря \ddot{x}_1 и определяется сила инерции. Далее сила трения и вычисляется ускорение робота, согласно принципам, описанным выше. По полученным значениям ускорений якоря и робота вычисляются их скорости и перемещения. При малом шаге интегрирования это алгоритм обеспечивает достаточную точность расчетов.

Результаты моделирования. Далее было проведено моделирование движения виброробота и исследовалось влияние параметров виброробота на среднюю скорость объекта. Моделирование проводилось при заданных параметрах системы: $m = 0,025$ кг; $M = 0,1$ кг; $c = 50$ Н/м; $\mu = 0,5$; $c_1 = 3000$ Н/м; $\mu_1 = 10$. $U_0 = 5$ В. Варьируемыми параметрами выступали частота подаваемого напряжения $\omega = 1 \dots 90$ рад/с и величина зазора между магнитом и якорем $\Delta = 0,003 \dots 0,005$ м.

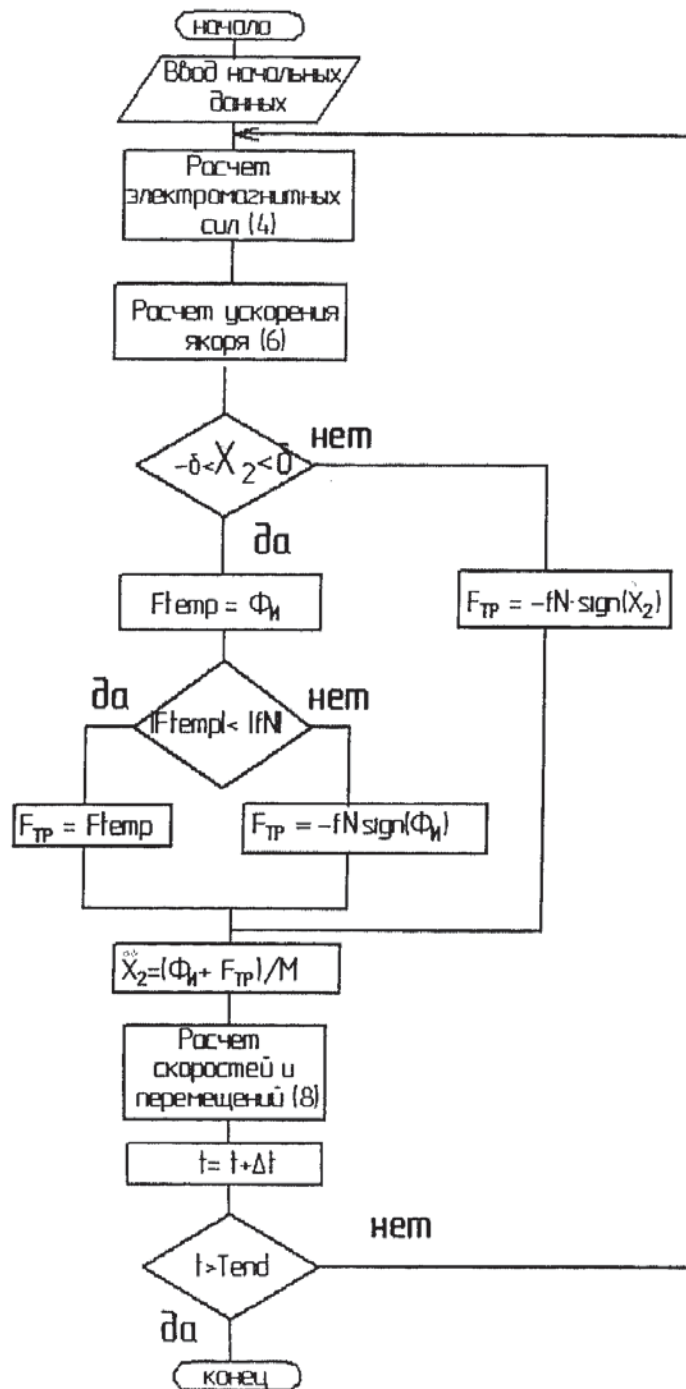


Рис. 6. Алгоритм расчетов системы дифференциальных уравнений (6)

На рис. 7—9 представлены графики перемещения робота, абсолютного и относительного перемещения якоря и напряжения, подаваемого на магнит, при различных частотах для $\Delta = 0,003$ м.

Из графиков (рис. 7) видно, что движение периодичное с остановками. При этом время одного шага робота T равно периоду частоты подаваемого напряжения

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \cdot 3,14}{1} = 6,28 \text{ (с)}. \text{ Функция перемещения робота сдвинута относительно функции}$$

напряжения на отрезок времени $t_1 = 0,5$ с, на этом отрезке скорость робота нулевая. Время одного шага робота равно $T = t_2 + t_3$, где $t_2 = 2$ с — время нарастания скорости, $t_3 = 4,28$ с — время остановки, на этом отрезке скорость робота остается равной нулю до следующей подачи напряжения на магнит. Движение робота на отрезке t_2 происходит практически равномерно. Мгновенная скорость при этом равна

$$v_m = \frac{h}{t_2} = \frac{0,0375}{2} = 0,019 \text{ (м/с)}, \quad (10)$$

где h — расстояние, которое проходит робот за один шаг.

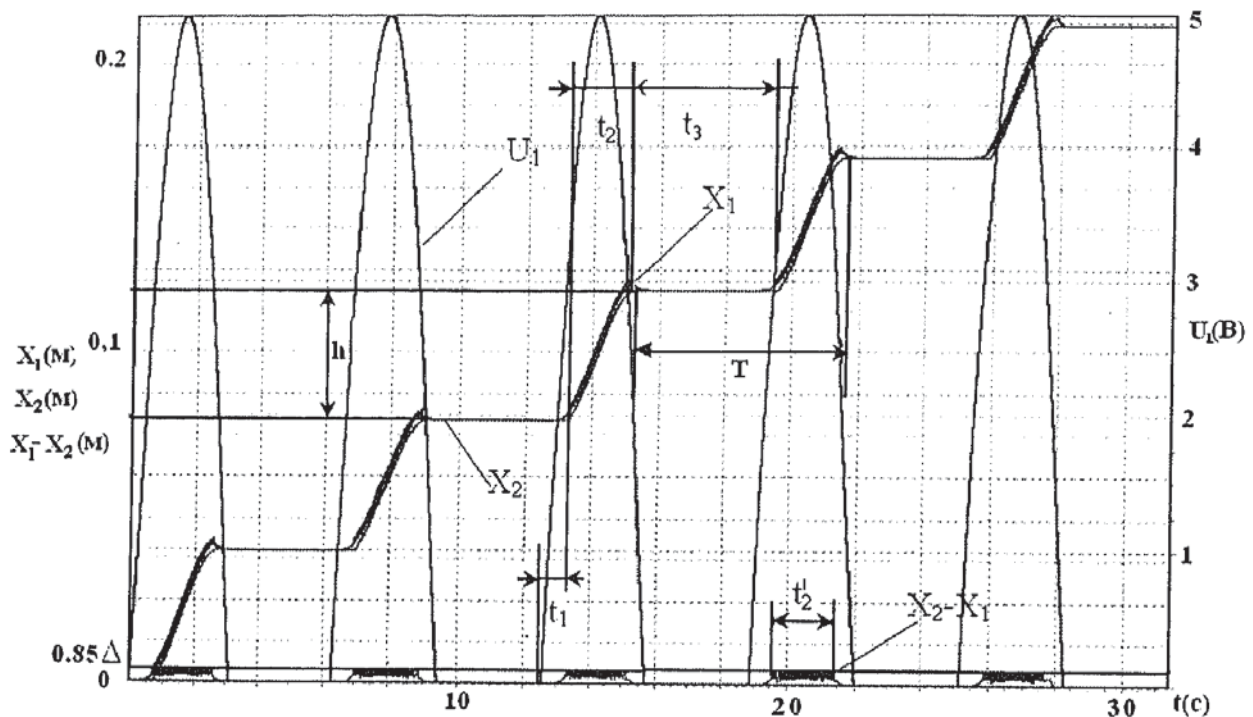


Рис. 7. Графики зависимости электрического напряжения U_1 , абсолютного перемещения робота X_2 , якоря X_1 и относительного перемещения якоря $X_2 - X_1$ для $\omega = 1$ рад/с при $\Delta = 0,003$

Из рис. 8 видно, что движение происходит аналогично предыдущему случаю. Время одного шага робота равно $T = 0,314$ с, определяется частотой подаваемого напряжения. Время сдвига с увеличением частоты уменьшается и составляет $t_1 = 0,1$ с. Время нарастания скорости $t_2 = 0,114$ с, время остановки $t_3 = 0,2$ с. За один шаг корпус перемещается на $h = 0,0007$, мгновенная скорость при этом $v_m = 0,0061$. При увеличении частоты подаваемого напряжения мгновенная скорость уменьшается, но увеличивается количество шагов робота за определенный интервал времени. Дальнейшее увеличение частоты приводит к тому, что средняя скорость робота уменьшается до нуля (рис. 9). При этом внутренняя масса колеблется с частотой внешнего периодического воздействия $T = 0,069$, а корпус робота остается на месте.

В дальнейшем исследовалось влияние частоты электрического напряжения и зазора между якорем и магнитами. В результате было получено семейство АЧХ — зависимостей амплитуды средней скорости робота $\dot{X}_2 = \int_0^T \dot{X}_2 dt$ от частоты для различных зазоров $\Delta = 0,003; 0,004; 0,005$ (рис. 10).

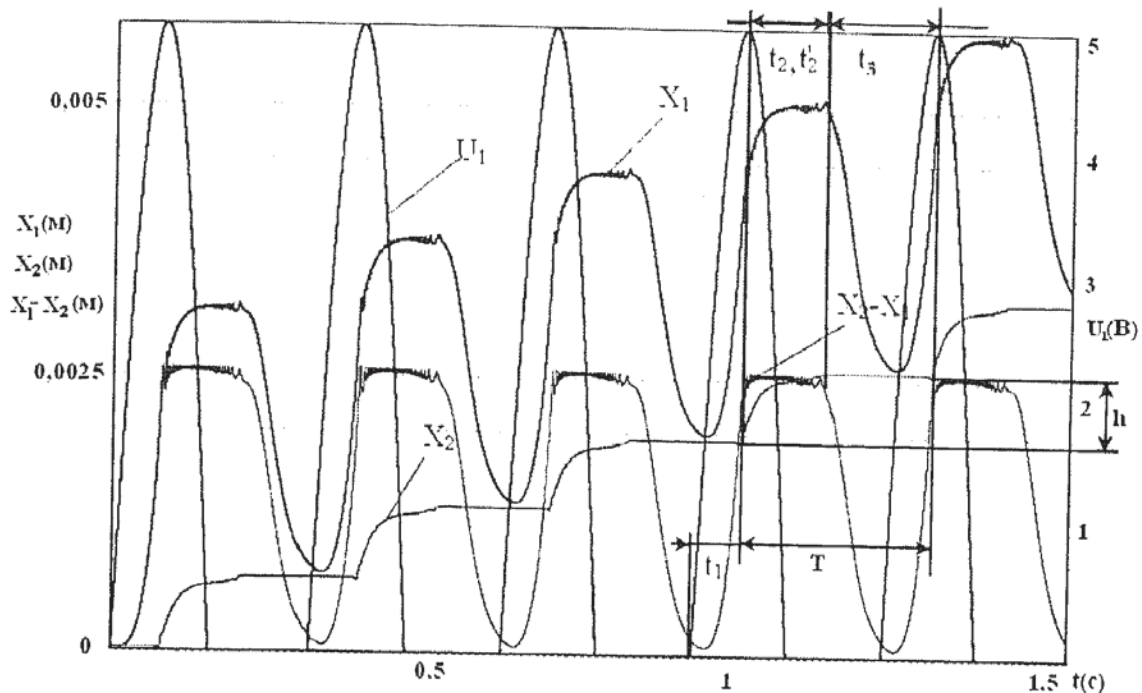


Рис. 8. Графики зависимости электрического напряжения U_1 , абсолютного перемещения робота X_2 , якоря X_1 и относительного перемещения якоря $X_2 - X_1$ для $\omega = 20$ рад/с

Из рис. 10—11 видно, что с ростом частоты средняя скорость робота падает и при некоторой предельной частоте Ω стремится к нулю. Результаты, приведенные на рис. 9 для частоты $\omega = 90$ 1/с, показывают, что в этом случае корпус робота не движется и его перемещение $h = 0$. Значение предельной частоты Ω зависит от величины зазора между магнитом и якорем Δ . С уменьшением зазора предельная частота увеличивается, графически эта зависимость представлена на рис. 12.

Анализируя АЧХ системы, можно сделать вывод, что существует две области резонансных частот. В первом интервале частот средняя скорость принимает максимальные значения, однако этот интервал очень узкий. Второй интервал частот более широкий, но амплитуда скорости здесь меньше. С увеличением зазора диапазон частот, при которых двигается робот, сужается.

На рис. 11 более подробно показана область I, где скорость принимает максимальные значения.

При движении робота представляется возможным реализовать два алгоритма управления скоростью посредством частоты: экстремальный, работающий в области низких частот и точно отслеживающий резонансную частоту ω_p (этот алгоритм позволяет добиться максимальных скоростей, но достаточно сложен в исполнении), и алгоритм управления, работающий на частотах от 5 до 35 рад/с, при котором скорость практически линейно зависит от частоты (для зазора 0,003).

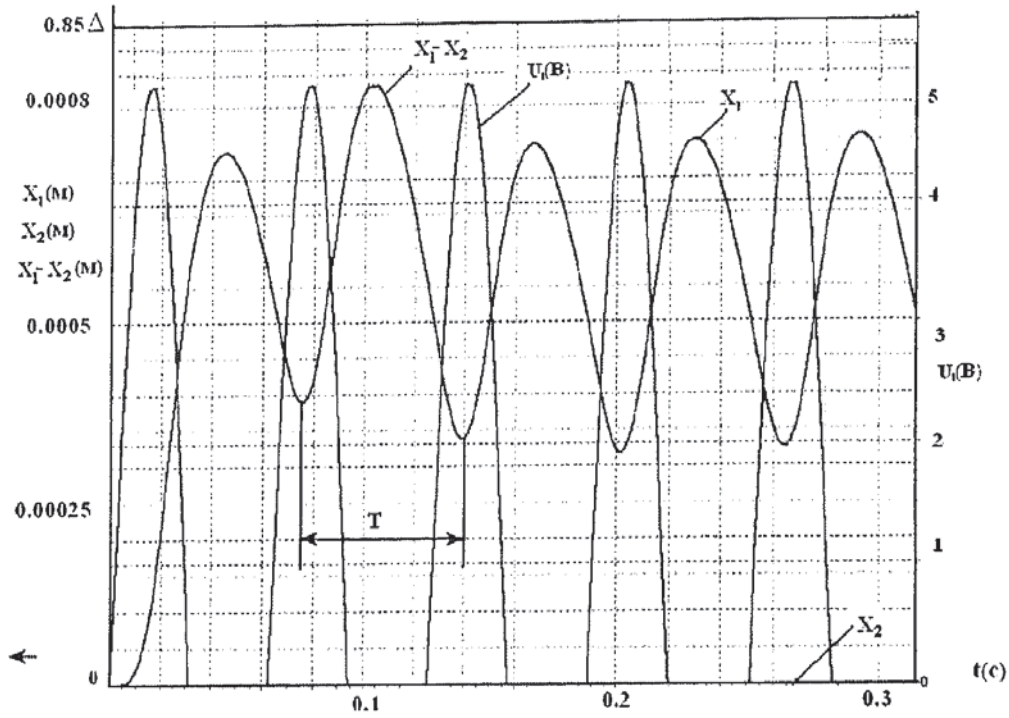


Рис. 9. Графики зависимости электрического напряжения U_1 , абсолютного перемещения ротора X_1 , абсолютного перемещения груза X_2 и относительного перемещения ротора $X_2 - X_1$ для $\omega = 90$ рад/с

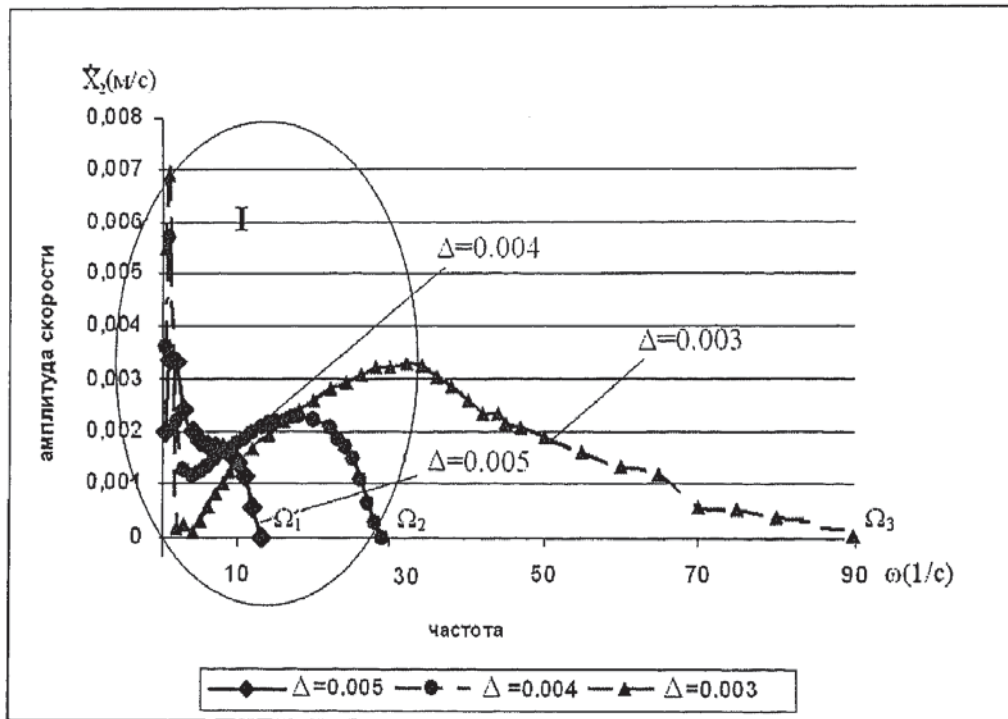


Рис.10. АЧХ системы для различных зазоров

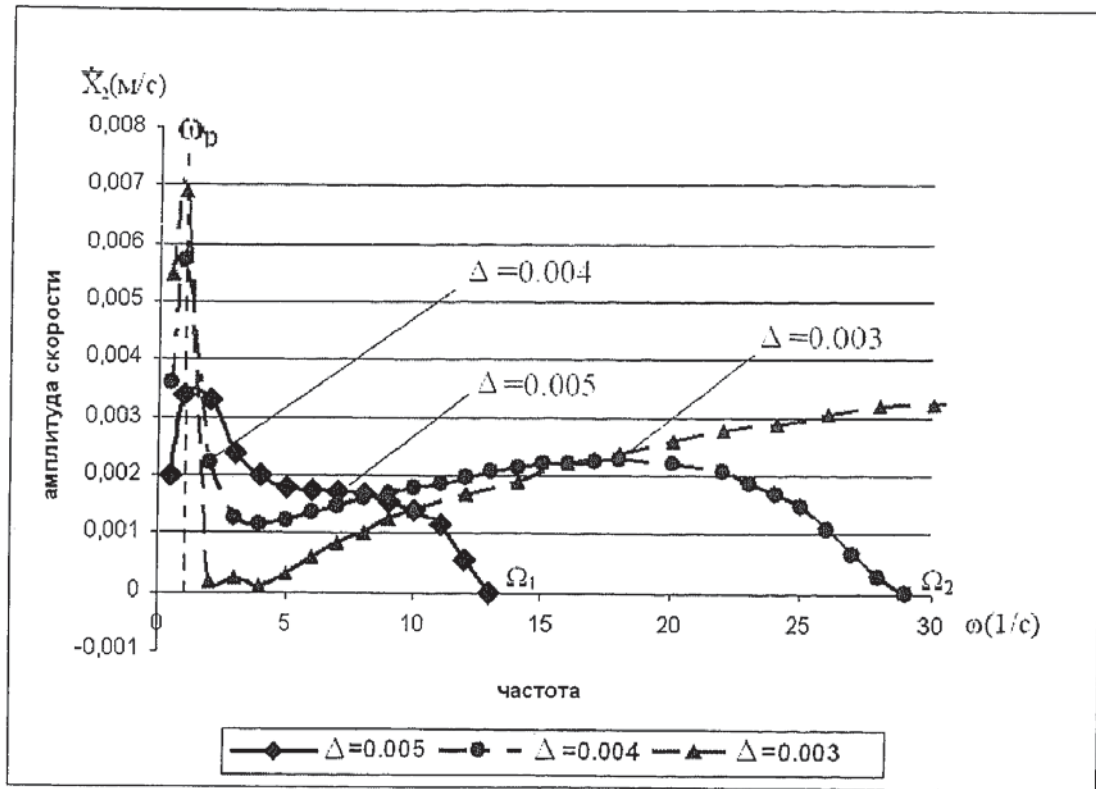


Рис.11. АЧХ системы для различных зазоров (область I)

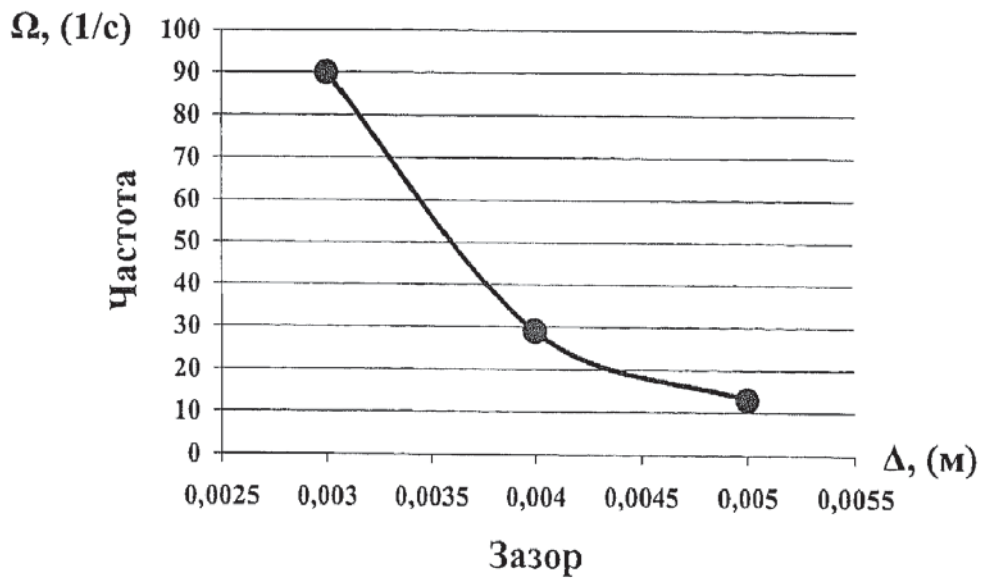


Рис. 12. Зависимость предельной частоты от зазора

Выводы

1. Предложена принципиальная схема робота с электромагнитным приводом и реактивной массой, установленной на упругих элементах в корпусе робота и совершающей несимметричное движение.

2. Разработана математическая модель системы, описывающая движение робота при подаче импульсного синусоидального электрического напряжения на электромагнит.

3. Установлено, что средняя скорость робота зависит от частоты подаваемого напряжения и величины зазора между магнитом и внутренней массой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aoshima S., Tsujimura T., Yabuta T. A miniature mobile robot using piezo vibration for mobility in a thin tube // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. — Vol. 115 (1993). — Pp. 270—278.
2. Jatsun S., Safarov J. Vibrating engine for robots. Proceedings. CLAWAR 2000. — Madrid. — Pp. 1016—1021.
3. Jatsun S., Jatsun S., Vorontsov R. Dynamics of vibrating robot for in pipe inspection International Symposium — SYROM. — Bucharest, 2001. — P. 205—209.
4. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Solovtsov V. N. Microsensor control of motion of compact robots inside tubes (in Russian) // *Mikrosistemnaya Tekhnika [Microsystem Engineering]*. — № 8. — 2002. — P. 11—19
5. Bolotnik N. N., Chernousko F. L., Kostin G. V., and Pfeiffer F. Regular motion of a tube-crawling robot in a curved tube // *Mechanics of Structures and Machines*. — 2002. — Vol. 30. — № 4. — P. 431—462.
6. Zimmermann K., Zeidis I., and Pivovarov M. Dynamics of a nonlinear oscillator in consideration of non-symmetric Coulomb dry friction, Fifth Euromech. Nonlinear Dynamics Conference. Book of Abstracts. Eindhoven Netherlands, August 7-12, 2005. — Pp. 308.
7. Chernousko F., Zimmermann K., Bolotnik N., Yatsun S., Zeidis I. Vibration — Driven Robots, The Workshop on Adaptive and Intelligent Robots: Present and Future. Proceedings. Vol. 1 The Institute for problem in mechanics RAS. Moscow. 2005. — P. 26—31.
8. Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Сафаров Д. И. Исследование движения двухмассового вибрационного робота // *Известия вузов. Машиностроение*. 2006. — № 5. — С. 32—42.
9. Черноусько Ф. Л. О движении тела, содержащего подвижную внутреннюю массу // *Докл. РАН*. 2005. — Т. 405. — № 1. — С. 1—5.
10. Черноусько Ф. Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы // *ПММ*. 2006. — Т. 70.
11. Черноусько Ф. Л. Оптимальное прямолинейное движение двухмассовой системы // *ПММ*. 2002. — Т. 66. — Вып. 1. — С. 3—9.
12. Динамика управляемых движений вибрационных систем / Н. Н. Болотник, И. М. Зейдис, К. Циммерман, С. Ф. Яцун // *Известия. РАН. ТИСУ*. — 2006. — № 5. — С. 1—11.
13. Вибрации в технике. Т.4. Вибрационные процессы и машины: Справочник / Под ред. Э.Э. Лавенделла. — М.: Машиностроение, 1981. — 509 с.
14. Вибрационные машины и технологии / С. Ф. Яцун, Д. И. Сафаров, В. Я. Мищенко, О. Г. Локтионова. — Баку — Элм, 2004.