

1565299

На правах рукописи

Веретимус Диана Константиновна

УДК 621.01

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАРТ-СТОПНЫХ
СИСТЕМ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ С ЦЕЛЮ
ПОВЫШЕНИЯ ИХ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.02.18 - Теория механизмов и машин

В21

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1999

Работа выполнена в Московском Государственном техническом
университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: академик РАН, доктор технических наук
Фролов Константин Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гончаревич Игорь Фомич
(Российская Инженерная Академия)

кандидат технических наук, доцент
Ушаков Вячеслав Иванович
(Московский Государственный технический
университет им. Н.Э.Баумана)

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
"Экспериментальный научно-исследовательский
институт кузнечно-прессового машиностроения"

1565299

16 " февраля 2002 в 12.00
совета К 053.15.11 в Московском
тете им. Н.Э.Баумана по адресу:

Бауманская у

иться в б

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1565299

Веретимус Д. К. Исследовани

декабря 1999 г.

Попов П.К.

л. Заказ № 163. Тираж 100 экз.

Н.Э. Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для обслуживания технологического оборудования используются двухпозиционные цикловые манипуляционные системы, по характеру движения - старт-стопные. Одной из важнейших задач совершенствования таких манипуляционных систем является повышение их быстродействия.

Применение привода с рекуперацией энергии по сравнению с пневматическим увеличивает быстродействие до 2-3 секунд за цикл, на порядок снижает энергозатраты и при этом обеспечивает такие важные характеристики, как плавность режима "разгон-торможение" и выход на упоры со скоростью, близкой к нулевой. Одной из наиболее перспективных разработок в этой области является манипулятор с упругим звеном.

Актуальность работы определяется необходимостью решения важной прикладной научно-технической задачи, а именно, разработки основных параметров проектирования (кинематических и динамических характеристик) манипуляционной системы с упругим звеном, позволяющих, по сравнению с остальными цикловыми манипуляторами с рекуперацией энергии, существенно увеличить быстродействие.

Цель работы. Цель диссертации - исследование закономерностей влияния конструктивных элементов двухпозиционной старт-стопной системы с рекуперацией энергии на параметры движения ее рабочего органа, разработка методик расчетов параметров кинематических и динамических характеристик системы и разработка системы исходных данных для их проектирования.

Научная новизна. На защиту выносятся основные положения диссертации, содержащие элементы научной новизны:

- результаты исследования возможности повышения быстродействия путем изменения конфигурации упругого звена;
- методика расчета кинематических и динамических характеристик двухпозиционной старт-стопной системы с упругим звеном;
- метод расчета кинематических и динамических характеристик новой оригинальной схемы манипуляционной системы параллелограммного типа;
- методика расчета параметров упругого звена по заданным техническим условиям;

- математическая модель новой схемы управления электромагнитного механизма, позволяющая реализовать оптимальный тепловой режим и снизить скорость якоря в момент касания им сердечника.

Методы исследований. При разработке математических и динамических моделей используются теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические методы базировались на теории колебаний и теории механизмов и механики машин. Экспериментальные исследования проводились для проверки достоверности теоретических результатов и осуществлялись на специально изготовленных стендах.

Практическая ценность работы. На основе проведенных исследований и полученных результатов:

- разработана методика синтеза параметров упругого элемента стартовой системы с заданным быстродействием при сохранении заданной прочности упругого элемента;
- предложена новая схема управления электромагнитным механизмом, позволяющая наиболее простым конструктивным решением уменьшить величину необходимого напряжения и улучшить тепловой режим в позициях выстоя;
- предложена схема двухпозиционной манипуляционной системы параллелограммного типа, позволяющая обеспечивать плоскопараллельное перемещение детали.

Реализация работы. Результаты работы в виде методик расчета и работающего макетного образца, переданы для реализации в АО ЭНИКМАШ и ТОО "Рекупер". Результаты диссертационной работы внедрены в НИР ИМАШ РАН им. А.А.Благонравова по проекту "Улучшение быстродействия и КПД роботов-манипуляторов путем использования собственных колебательных движений", ставшему призом конкурса на соискание медали РАН для молодых ученых в области проблем машиностроения и процессов управления в 1998 г. (постановление Президиума РАН № 272 от 13.07.98).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научном семинаре кафедры РК-2 МГТУ им. Н.Э.Баумана 20 ноября 1997 года; на совместном семинаре кафедр РК-2 и РК-5 МГТУ им. Н.Э.Баумана 11 марта 1999 года; на научно-техническом семинаре ИМАШ РАН 8 мая 1998 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 141 странице машинописного текста, включая 60 рисунков и 4 таблиц, и состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 107 наименований и приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, раскрывается актуальность темы, научная новизна и практическая ценность, поставлены цели, кратко сформулированы основные положения диссертации.

В первой главе проведен обзор литературы, посвященной созданию старт-стопных систем с рекуперацией энергии. Показаны преимущества и недостатки каждого типа аккумуляторов энергии.

Аккумуляторам потенциального типа с накопителями энергии в виде пружины, посвящены работы А.И.Корендясева, Б.Л.Саламандры, Л.И.Тывеса, Л.М.Болотина, А.Е.Кобринского, С.В.Левина и других.

В результате анализа старт-стопных систем с рекуперации энергии показан один из путей повышения быстродействия: объединение традиционного звена и накопителя энергии в виде пружины в упругое звено. В данном случае повышение быстродействия возможно при практически неизменных энергозатратах, по сравнению с известными двухпозиционными системами с рекуперацией энергии.

Типовой пример старт-стопной системы с упругим звеном и его возможная динамическая модель приведены на рис. 1. Данная система состоит из упругого звена 1, захватного устройства (ЗУ) 2, фиксирующих электромагнитов 3 и 3'.

В начальном положении упругое звено 1 изогнуто и удерживается электромагнитом 3. При поступлении команды электромагнит 3 отключается, то есть освобождает звено 1, и система разгоняется энергией деформированного упругого звена. В среднем положении вся потенциальная энергия упругого звена переходит в кинетическую. Начинается этап торможения. Упругое звено 1 изгибается в противоположную сторону и к концу цикла вся кинетическая энергия снова переходит в потенциальную. Система останавливается и удерживается электромагнитом 3'. Очень важно, что компенсация диссипативных потерь в упругом звене осуществляется самими фиксирующими электромагнитами 3 и 3'.

Обосновывается необходимость проведения исследований для

манипуляционной системы с упругим звеном.

В докладах М.Б.Паркинсона, Л.Л.Ховелла, Д.Д. Коха и других на инженерно-технической конференции в США 1997 году были рассмотрены различные механические системы с гибкими звеньями. Следует отметить, что в этих работах рассмотрено только позиционирование по 2^м

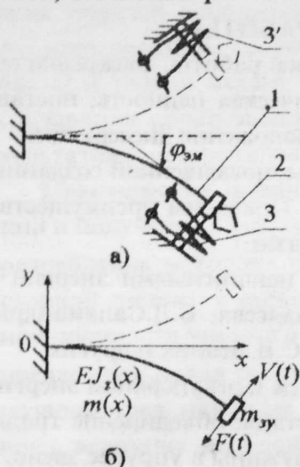


Рис. 1. Манипуляционная система с упругим звеном (а) и ее схема (б)

положениям и дано обоснование применимости методов и расчетных моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами. В данной работе рассматриваются кинематические и динамические характеристики упругого звена не только в точках позиционирования, но и в процессе его движения.

Определены задачи исследований:

1. На основе анализа кинематических и динамических характеристик системы с упругим звеном предложить способы повышения быстродействия start-стопных систем.
2. Разработать методику определения параметров упругого звена по заданным техническим условиям.
3. Предложить систему управления, обеспечивающую существенное уменьшение скорости ЗУ в положениях крайних и близких к крайним.
4. Разработать конструкцию start-стопной системы с упругим звеном, исключающую поворот торца ЗУ относительно торца электромагнита в момент их контакта.

В реальной системе характеристики материала нелинейны; в первый момент касания якорем сердечника происходит точечный контакт, что приводит к деформациям материала; в этот же момент происходит удар якоря о сердечник, так как скорость якоря в момент соприкосновения не будет равняться нулю; в общем случае угловые отклонения упругого элемента могут быть большими.

Движение рассматриваемой системы делится на два этапа: первый - движение системы вне зоны действия электромагнита только под действием инерционных сил (90+95% пути), второй - движение в зоне влияния электромагнита под действием также и вынуждающей электромаг-

нитной силы (5+10% пути). Таким образом $T=T_1+T_2$, где T - время перемещения ЗУ из одной точки позиционирования в другую; T_1 и T_2 - время первого и второго этапов движения соответственно, причем $T_1 \gg T_2$.

Во второй главе рассматривается первый этап этого движения и определяются кинематические и динамические характеристики, а также быстродействие - величина, обратная времени перемещения ЗУ из одного крайнего положения в другое. Принято, что упругое звено выполнено в виде заземленной пластинчатой пружины длиной l прямоугольного поперечного сечения с шириной b , значительно большей толщины h ($b \gg h$). На конце находится ЗУ и якорь, вес которых сравним с массой упругого звена (рис. 1).

Определяя быстродействие манипуляционной системы в первом приближении, рассмотрим упругое звено как стержень с непрерывно распределенными массовыми и деформационными характеристиками.

При проведении расчета принимаются следующие допущения:

- материал тела однороден, изотропен и подчиняется закону Гука;
- при отклонении упругого звена на малые углы, имеют место только малые поперечные колебания;
- система консервативна;
- масса ЗУ учитывается как точечная масса.

Тогда движение модели описывается дифференциальным уравнением поперечных колебаний:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E J_z(x) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \right) = -m(x) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2}.$$

Здесь $E J_z(x)$ - жесткость стержня, где E - модуль упругости первого рода, $J_z(x)$ - момент инерции относительно оси z ; $m(x) = \rho F(x)$ - погонная масса балки, где ρ - плотность материала, а $F(x)$ - площадь поперечного сечения балки.

Заменяя производную по x разностным выражением вместо нелинейного дифференциального уравнения четвертого порядка методом прямых получим систему дифференциально-разностных уравнений. Решение этой системы проведено методом прогонки.

Граничные условия:

- на закреплённом конце (при $x=0$) $y(0, t) = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x}(0, t) = 0$;

- на свободном конце (при $x=l$) $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(l, t) = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}(l, t) = 0.$

Начальные условия определяются статическим изгибом балки под действием приложенного усилия P и нулевой начальной скоростью:

$$\text{при } t=0 \quad y(x, 0) = y_0(x), \quad \frac{\partial y}{\partial t}(x, 0) = 0.$$

Программа решения уравнения движения на основе разностной схемы позволяет моделировать движение балки с одним заделанным, а другим свободным концами при параболическом изменении полуширины $b_l = A + Bx + Gx^2$ (где A , B и G - коэффициенты параболы) упругого элемента (рис. 2 - 4) и наличия массы ЗУ.

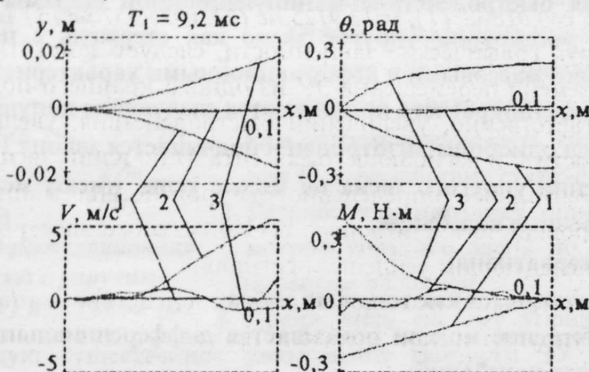


Рис. 2. График движения упругого звена ($B=0.21$; $G=-2.9$)

при $t=0.016$ мс (1), $t=4.4315$ мс (2), $t=9.2$ мс (3)

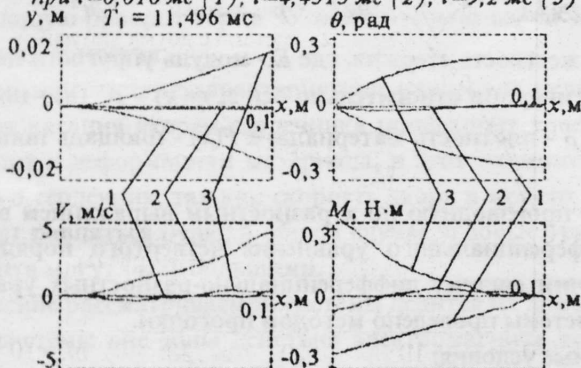


Рис. 3. График движения упругого звена ($B=0$, $G=0$)

при $t=0$ (1), $t=5.748$ мс (2), $t=11.496$ мс (3)

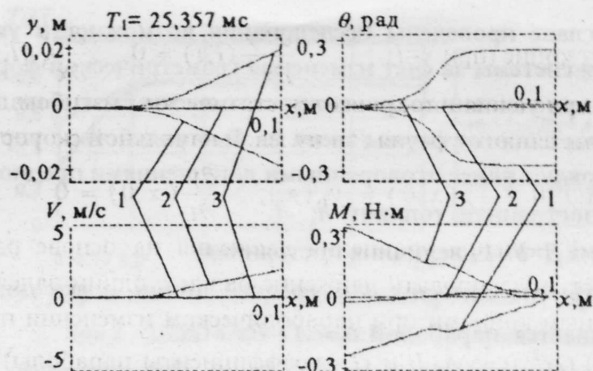


Рис. 4. График движения упругого звена ($B=-1,0$; $G=11,0$)
при $t=0,016$ мс (1), $t=12,9125$ мс (2), $t=25,357$ мс (3)

Анализируя графические зависимости, следует заметить, что при уменьшении времени перемещения ЗУ из одного крайнего положения в другое, и соответственно, увеличении быстродействия, увеличиваются перепады скорости V и изгибающего момента M по длине звена.

Экспериментальное определение быстродействия манипуляционной системы проводилось с помощью бесконтактного электромагнитного датчика с последующим усилением сигнала.

Экспериментальное исследование быстродействия манипуляционной системы с упругим звеном показало приемлемость принятой модели (рис. 5).

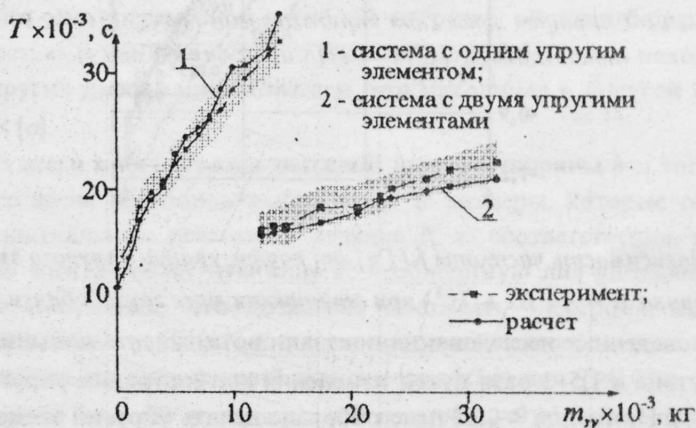


Рис. 5. График зависимости времени перемещения ЗУ из одного крайнего положения в другое от массы захвата

Далее в главе проведены исследования возможности увеличения быстродействия системы за счет изменения геометрической формы упругого элемента, при условии сохранения постоянства его площади.

Для оценки влияния формы звена на быстродействие упругого манипулятора наряду с ранее оговоренными допущениями предположим:

- звено имеет постоянную толщину h ;
- площадь звена $S=b \times l$ - величина постоянная;
- звено симметрично относительно средней линии, а его полуширина $b_1=b/2$ описывается параболой $b_1 = A + Bx + Gx^2$.

Независимых параметров будет только 2 - B, G , а параметр A определяется из условия $S = const$: $A = 0,5(S/l) - 0,5Bl - G(l^2/3)$.

В результате расчета получена зависимость частоты $f = 1/T_1$ от конфигурации упругого элемента и заданной массы захватного устройства. На рис. 6 представлена зависимость $f(B, G)$ в виде сечений.

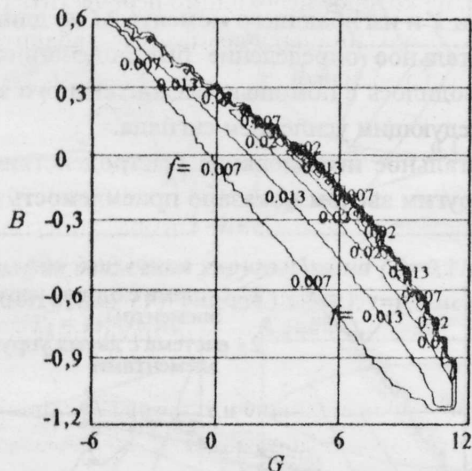


Рис. 6. Зависимость частоты f [Гц] от конфигурации упругого элемента (полуширина $b_1 = A + Bx + Gx^2$) при отношении масс груза и балки $m_g/m = 1$

Проведенные исследования показали возможность повышения быстродействия в 1,5-3 раза путем изменения конфигурации упругого звена (рис. 7). При $m_g/m < 0,25$ целесообразно делать упругий элемент с полушириной, изменяющийся по параболическому закону ($b_1 = Gx^2 + Bx + A$), а при $m_g/m > 0,25$ выгоден линейный закон изменения ($b_1 = Bx + A$).

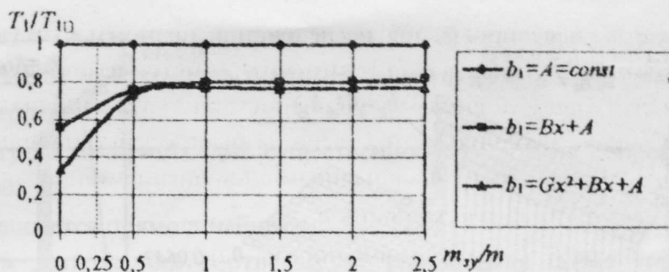


Рис. 7. График зависимости отношения времени T_1 упругого звена при $b=2(Gx^2+Bx+A)$ к времени T_{10} при $b=const$ от отношения массы ЗУ к массе упругого звена m_{zy}/m

В третьей главе предложена методика определения параметров (длины l , ширины b и толщины h) упругого элемента манипулятора по заданным техническим условиям:

- $T \approx T_1$ - время перемещения ЗУ из одного крайнего положения в другое;
- H - расстояние, на которое необходимо переместить груз;
- $l_{max}, b_{max}, h_{max}$ - максимально возможные габаритные размеры;
- геометрия упругого элемента;
- m_{zy} - масса ЗУ;
- M - масса переносимого груза.

Минимально возможные размеры упругого звена находятся из следующих соображений: необходимо, чтобы упругий элемент, подвергающийся знакопеременной изгибной нагрузке, обладал большой долговечностью, а это означает, что рабочая нагрузка должна находиться в зоне упругих деформаций. Считаем, что находимся в упругой области, если $\sigma < [\sigma]$.

Из всего многообразия значений длины l , ширины b и толщины h упругого звена перебором выбираются те размеры, которые обеспечивают минимальную реакцию в заделке P , а, соответственно, и минимальную электромагнитную силу F , необходимую для удержания ЗУ в крайнем положении, что позволяет поставить электромагниты наименьшей мощности. На рис. 8 показан результат расчета в виде трехмерного графика и в виде сечений зависимости $h(l, b)$ при $T=0,02$ с, $H=0,2$ м и суммарной массе ЗУ и переносимой детали $m_{\Sigma}=0,1$ кг. В верхней части графика записаны параметры l, b и h упругого звена при $P=P_{min}$.

$$P_k = 671,1794 \text{ Н}, l_k = 0,45 \text{ м}, \\ b_k = 0,036352 \text{ м}, h_k = 0,006887 \text{ м}$$

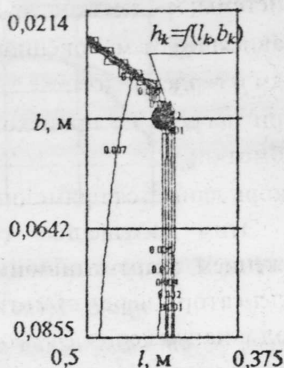
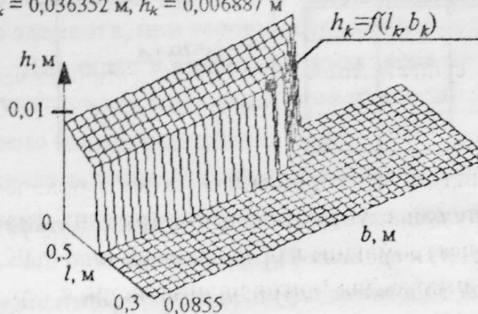


Рис. 8. Зависимость толщины h от ширины b и длины l упругого элемента при $T=0,02$ с, $H=0,2$ м и $m_x=0,1$ кг

Настройка на заданное быстродействие осуществляется изменением длины упругого элемента.

В четвертой главе рассматривается второй этап движения. Выбрана схема электромагнитного привода, обеспечивающая минимальные потери энергии, с П-образным электромагнитом.

Для уменьшения тепловыделения была предложена схема электромагнитного механизма, которая в автоматическом режиме плавно уменьшает напряжение до напряжения удержания без дополнительного введения в схему переключателей и датчиков.

Электромагнитный механизм представляет собой нелинейную систему с переменными параметрами. Для упрощения описания механизма принять следующие допущения:

- магнитная проницаемость μ_{cm} постоянна;
- потери определяются в основном диссипацией энергии в упругом элементе; коэффициент эквивалентного трения β определяется из условия равенства работы сил вязкого трения на траектории движения звена и потерь энергии на внутреннее трение в упругом элементе;
- закон движения звена мало отличается от гармонического.

Тогда уравнение движения выглядит следующим образом

$$m\ddot{x} + \beta \dot{x} + kx - F(i, \delta) = 0;$$

где m - суммарная масса упругого звена и ЗУ манипуляционной

системы; k - жесткость упругого звена, $F(i, \delta)$ - усилие электромагнита, зависящее от мгновенного значения силы тока i и зазора δ между якорем и сердечником;

- при нагреве не происходит существенного изменения сопротивления обмотки;
- якорь движется прямолинейно.

Этим допущениям соответствует упрощенная схема управления движением старт-стопной системой с упругим звеном (рис. 9). Разряд конденсатора через обмотку электромагнита обеспечивает плавный переход с напряжения U , необходимого для притягивания якоря к сердечнику, до напряжения удержания $U_{уд}$.

Рассмотрены два этапа управления движением:

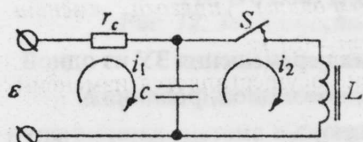


Рис. 9. Упрощенная схема включения электромагнита с емкостью

1. До включения фотодатчика (ключ S разомкнут). Звено движется за счет колебательных свойств системы (этот этап рассмотрен в главе 2). В это же время происходит зарядка конденсатора.

2. После включения фотодатчика (ключ S замкнул контур 2). Звено движется

под действием также и вынуждающей электромагнитной силы. В этом случае моделируется работа фотодатчиков положения якоря и определяется общее количество тепла, выделившееся в обмотке, которое является одним из критериев эффективности импульсного питания.

Анализ математической модели показал, что такая схема электромагнитного механизма, по сравнению с аналогичной без конденсатора (б/к), не только позволяет понижать напряжение, но и снижает: в 5 раз скорость якоря V_{end} в момент касания им сердечника (рис. 10), в 1,2 раза среднюю силу тока i_{cp} и в 1,5 раза общее количество тепла Q . Показано, что время второго этапа движения T_2 существенно меньше времени T_1 и составляет $<10\%$ от времени движения T .

Измерения, проведенные на экспериментальном макете, доказали приемлемость предложенной модели и работоспособность схемы управления системой с упругим звеном (рис. 11). На рис. 11 приведено экспериментально полученное время полуцикла движения $T_{пч} = T + T_{уд} = 120$ мс ($m_{я} = const$); таким образом манипуляционная система с упругим звеном

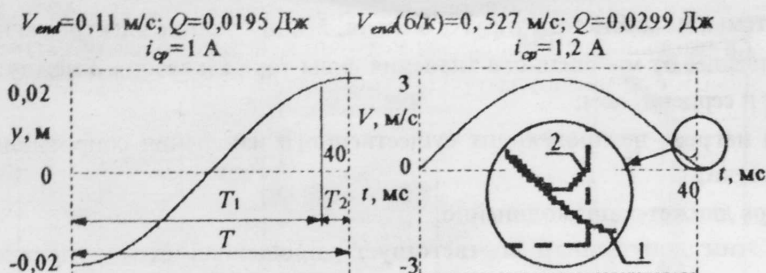


Рис. 10. Графики зависимостей положения y ЗУ и скорости V от времени t при $c=1000 \text{ мкФ}$ (1) и без конденсатора (2)

имеет быстродействие значительно выше (время цикла движения $T_{\eta}=2T_{\text{н}}=0,24 \text{ с}$), чем аналогичные системы с рекуперацией энергии ($T_{\eta}=2+3 \text{ с}$), при одинаковой мощности привода (всего 6 Вт).



Рис. 11. Сравнение экспериментальных характеристик с результатами расчета при $\delta_n=1 \text{ мм}$ (1) и $\delta_n=1,6 \text{ мм}$ (2)

В пятой главе показано, что недостатком системы с упругим звеном или одним упругим элементом (УЭ), описанной в первой главе, является поворот на некоторый угол детали в процессе ее переноса из одной точки позиционирования в другую. Дальнейшее транспортирование такой детали может быть затруднено. Устранить этот недостаток возможно, развернув электромагниты под угол $\varphi_{\text{зм}}$ равный нулю к недеформированному УЭ манипулятора (рис. 1).

Рассмотрев изменение координаты y_k крайнего положения ЗУ при его переходе из одной точки позиционирования в другую и времени T от угла $\varphi_{\text{зм}}$ (рис. 12) следует сделать вывод, что из условия безударного останова электромагниты манипуляционной системы с одним упругим элементом целесообразно располагать под углом, близким к углу пово-

рота на консольном конце θ_k (в рассматриваемом случае $\theta_k = 17^\circ$). Здесь y_{min} - минимальное расстояние, на котором действует электромагнитная сила. Для работы манипулятора без сбосв необходимо, чтобы $y_k > y_{min}$.

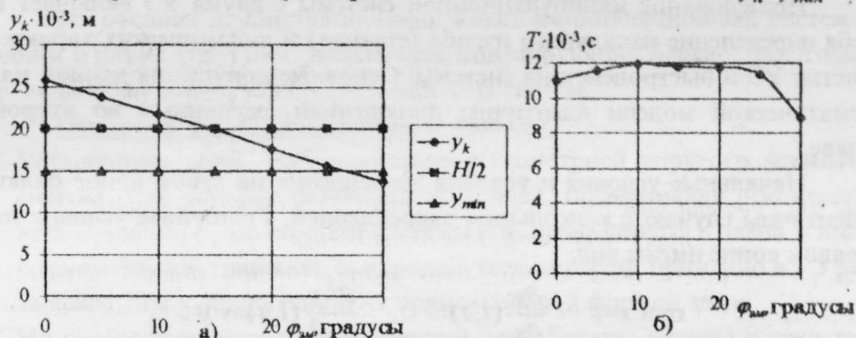


Рис. 12. Зависимость координаты y_k (а) и времени t (б) от угла наклона электромагнита $\phi_{зм}$

Устранить же поворот детали в позициях выстоя позволяет манипуляционная система с двумя УЭ (рис. 13). Данная система представляет собой упругий параллелограмм. Поэтому в отличие от предыдущего случая, ЗУ совершает движение, близкое к плоскопараллельному.

Следует отметить, что при деформации УЭ при таком построении системы в них возникают не только поперечные Q , но и продольные силы N и в общем случае поворот якоря в процессе движения неизбежен. Показано В.А.Светлицким и В.И.Фоминим, а в работе проверено и подтверждено, что при выполнении условия $a > 5h$ (где $2a$ - расстояние между упругими элементами) продольными силами, а, следовательно, и поворотом ЗУ можно пренебречь. Это позволило перейти от реального

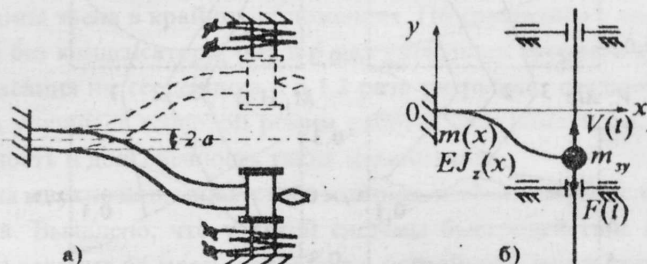


Рис. 13. Манипуляционная система с двумя упругими звеньями (а) и ее схема (б)

механизма к модели, показанной на рис. 13, у которой приведенная жесткость УЭ равна жесткости двух УЭ системы.

Исследование манипуляционной системы с двумя УЭ включает в себя определение начального изгиба (статики) и динамических характеристик УЭ и быстродействия системы. Основные допущения данной математической модели идентичны допущениям, сделанным во второй главе.

Начальные условия и условия закрепления на левом конце балки идентичны случаю с консольным закреплением. Граничные условия на правом конце имеют вид:

$$\text{при } x=l \quad \frac{\partial y}{\partial x}(l, t) = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}(l, t) = 0.$$

При помощи разностной схемы методом прогонки определены: начальный (статический) изгиб упругого элемента, кинематические и динамические характеристики УЭ и быстродействие манипуляционной системы с двумя УЭ (рис. 14).

Результаты эксперимента подтверждают результаты расчетов (рис. 5).

Показано, что у старт-стопной системы с двумя УЭ быстродействие меньше зависит от массы ЗУ, чем у системы с упругим звеном, при одинаковой массе и жесткости упругого звена обеих систем.

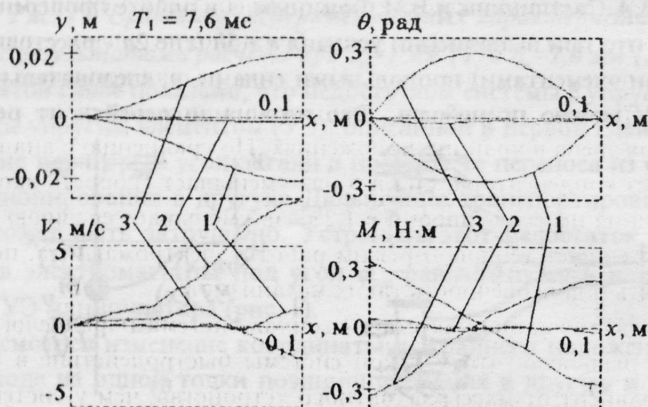


Рис. 14. График движения упругого элемента системы с двумя УЭ при $B=0$; $G=0$ ($t=0,091$ мс (1), $t=3,56$ мс (2), $t=7,6$ мс (3))

Следует отметить, что при расчете систем с более высоким быстродействием необходимо учитывать влияние аэродинамических и центробежных сил.

Изготовлен демонстрационный макет манипуляционных систем с одним и двумя упругими элементами, моделирующий перенос заготовки по заданному маршруту при помощи этих систем.

Основные результаты работы и выводы.

1. Установлена связь быстродействия с геометрией упругого элемента системы при условии равенства площадей, позволившая рекомендовать создание старт-стопной системы с формой упругого звена в виде прямоугольной трапеции, быстродействие которой примерно в 1,5 раза выше, чем у аналогичной - с прямоугольной формой звена.
2. На основе выявленных зависимостей разработаны методы и средства повышения быстродействия старт-стопных манипуляционных систем, которые показали, что применение упругого звена в качестве базового позволяет достичь значительно более высоких скоростей, чем в ранее используемых устройствах с жестким звеном и накопителем потенциальной энергии при практически одинаковых энергозатратах.
3. Разработана методика определения параметров упругого элемента манипуляционной системы с упругим звеном, при которых реакция в заделке будет минимальна, позволяющая синтезировать механизм с требуемым быстродействием при заданных массе и положении груза.
4. Предложена схема управления электромагнитным механизмом старт-стопной системы с конденсатором, без дополнительного введения в нее переключателей и датчиков. При этом разряд конденсатора обеспечивает плавное понижение напряжения при переходе на режим удержания звена в крайних положениях. По сравнению с аналогичной схемой без конденсатора, она в 5 раз уменьшает скорость якоря в момент касания им сердечника и в 1,2 раза уменьшает среднюю силу тока, что улучшает тепловой режим работы электромагнита, повышает надежность и долговечность таких механизмов.
5. Создана двухпозиционная старт-стопная система параллелограммного типа. Выявлено, что у такой системы быстродействие в меньшей степени зависит от массы захватного устройства, чем у системы с одним упругим элементом, при одинаковой массе и жесткости упругого звена обеих систем.

6. Экспериментальная проверка подтвердила приемлемость математических моделей для оценки характеристик старт-стопных систем с упругим звеном.
7. Рекомендации, разработанные по полученным результатам исследований, переданы заинтересованным организациям: АО ЭНИКМАШ и ТОО "Рескупер" для использования в практике конструирования реальных механизмов. Результаты работы внедрены в НИР ИМАШ РАН им. А.А.Благоднарова по проекту "Улучшение быстродействия и КПД роботов-манипуляторов путем использования собственных колебательных движений" (постановление Президиума РАН № 272 от 13.07.98). Работа, выполненная по проекту, стала призером конкурса на соискание медали РАН для молодых ученых в области проблем машиностроения и процессов управления в 1998 г.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Веретимус Д.К. Численное определение параметров манипуляционной системы с упругим звеном // Компьютерная хроника. - 1998. - № 4. - С. 53-62.
2. Веретимус Д.К., Левин С.В. Расчет динамических характеристик манипуляционных систем с упругими звеньями // Компьютерная хроника. - 1998. - № 4. - С. 37-52.
3. Веретимус Д.К., Левин С.В. Моделирование на ЭВМ работы электромагнитного привода манипулятора с упругим звеном // Компьютерная хроника. - 1998. - № 9. - С. 35-62.
4. Корендясов А.И., Левин С.В., Веретимус Д.К. Варианты расчета на ЭВМ динамических характеристик консольно закрепленного упругого элемента // Компьютерная хроника. - 1998. - № 5. - С. 63-76; № 7. - С. 75-94.
5. Корендясов А.И., Левин С.В., Веретимус Д.К. О повышении быстродействия упругих манипуляторов с рекуперацией энергии // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1998. - № 4. - С. 92-95.
6. Веретимус Д.К. Определение зависимости приложенной силы от формы упругого звена манипулятора при помощи ЭВМ // Компьютерная хроника. - 1999. - № 10. - С. 115-126.