

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИЛОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

*Г.Я. Пятибратов, Н.А. Сухенко*

Рассмотрены подъемно-транспортные устройства, при работе которых требуется осуществлять перемещение и позиционирование объектов с помощью незначительных усилий рук человека, прикладываемых непосредственно к перемещаемому объекту. Проанализированы применяемые способы реализации их конструкции и технические характеристики, на основе которых сформулированы требования к электромеханической системе рассматриваемых подъемно-транспортных манипуляторов.

С учётом недостатков существующих систем управления предложен новый подход при построении систем управления электроприводов подъемно-транспортных манипуляторов. С помощью методов оптимального управления, основанных на вариационном исчислении, с учётом реальных ограничений управляющего воздействия и энергетических возможностей электропривода выполнен синтез оптимального регулятора усилия в электромеханической системе с обратной связью по ускорению электро-двигателя.

С использованием методов математического моделирования применительно к манипулятору МП-100 выполнены исследования, подтверждающие преимущества предлагаемой структуры системы управления подъемно-транспортными манипуляторами, которая позволит повысить качество функционирования манипулятора.

*Ключевые слова:* подъемно-транспортный манипулятор, оптимальный регулятор, регулирование усилий, электропривод.

### Введение

В различных отраслях промышленности для транспортировки заготовок и изделий к последующим технологическим операциям или для складирования применяются различные подъемно-транспортные устройства и машины. Среди них можно выделить устройства, при работе с которыми оператору необходим контакт с перемещаемым объектом в процессе его движения и особенно при позиционировании. К таким устройствам можно отнести специальные грузоподъемные устройства и сбалансированные манипуляторы (СМ), которые можно отнести к классу подъемно-транспортных манипуляторов (ПТМ).

В качестве исполнительного привода в ПТМ применяют гидравлический, пневматический и электрический привод. Доступность и простота использования электрической энергии определила широкое распространение ПТМ с электроприводом [1, 2].

При креплении груза или объекта манипулирования в грузозахватном механизме его перемещение в рабочем пространстве ПТМ осуществляется с помощью электропривода (ЭП) при воздействии рукой на кнопки или рычаги управления скоростью двигателя. При этом другой рукой он может позиционировать объект в пространстве и перемещать по необходимой траектории.

Специальные грузоподъемные устройства обычно реализуются с применением канатных передач и содержат барабан, на который наматывается канат с грузозахватным блоком и вместе с двигателем подвешивается к балке, вдоль которой может перемещаться [3]. В свою очередь балка может перемещаться по рельсам, проложенным на

стенных колоннах или опорах цеха, увеличивая тем самым зону обслуживания.

Сбалансированные манипуляторы и консольные грузоподъемные краны конструктивно состоят из колонны, на которой располагается головка с исполнительным устройством рычажного типа. Головка с расположенным в ней электродвигателем и устройством управления поворачивается относительно вертикальной оси колонны [2]. Такие манипуляторы более компактны и имеют радиальную зону обслуживания, что актуально на операциях перегрузки объектов.

### Обобщённые требования

Анализ и обобщение требований к рассматриваемым грузоподъемным устройствам и механизмам позволяет выделить среди них манипуляторы, применение которых в промышленности определяется следующими техническими характеристиками:

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| – грузоподъемность                     | до 1000 кг;             |
| – скорость вертикального перемещения   | от 0,03 до 0,5 м/с;     |
| – скорость горизонтального перемещения | до 0,33 м/с;            |
| – ускорение                            | до 2 м/с <sup>2</sup> ; |
| – высота обслуживания                  | до 3,2 м;               |
| – угол поворота                        | до 360°;                |
| – радиус обслуживания                  | до 4 м.                 |

Выполненный анализ технических характеристик и функциональных возможностей позволяет отметить преимущества ПТМ:

- отработка сложных траекторий перемещения объекта при непосредственном воздействии на него оператора;

- возможность плавного изменения скорости перемещения объекта;
- плавное перемещение объекта из позиции в позицию и точная остановка его в заданной точке при движениях на малых скоростях.

### Существующие способы управления

Качественное и надежное функционирование ПТМ во многом определяется конструкцией механизмов перемещения и системой управления исполнительного привода, который должен обеспечивать возможность плавного изменения скорости манипулятора без рывков, вибраций и просадок объекта, а также ограничение ускорения привода в пуско-тормозных режимах с целью снижения динамических нагрузок в его механической части.

В зависимости от требований технологического процесса, который обслуживает ПТМ, а также от функций и операций, выполняемых системой управления, их исполнительные приводы реализуют различными способами.

Наиболее простым способом является управление исполнительным приводом ПТМ при перемещении объекта с фиксированной скоростью [1]. В этом случае пуск и торможение электродвигателя сопровождается повышенными колебаниями объекта, что обуславливает необходимость снижения рабочей скорости его перемещения. Применение нерегулируемых электроприводов оправдано для ПТМ с достаточно большой зоной обслуживания при отработке прямолинейных траекторий, когда соударение при перемещении с другими объектами исключено.

Использование в ПТМ асинхронного ЭП обуславливает ряд дополнительных требований к системе управления. При наличии активного момента нагрузки на валу двигателя требуется применение однонаправленной силовой передачи от двигателя к объектовому блоку манипулятора, что обуславливает значительное увеличение тепловых потерь в двигателе, выделяющихся при использовании параметрического способа регулирования скорости [5]. Снизить колебательность перемещаемого объекта в пуско-тормозных режимах позволяет использование для управления асинхронным электродвигателем устройства плавного пуска, которое уменьшает рывки и просадки объекта в процессе перемещения. Однако применение устройства плавного пуска в системе электропривода ПТМ не позволяет длительно регулировать скорость перемещения объекта.

При необходимости движения объекта по сложным траекториям в электромеханической системе современных ПТМ часто применяются частотные преобразователи. Они позволяют плавно регулировать скорость вращения электродвигателя исполнительного механизма в широком диапазоне и обеспечивают при этом требуемую динамику при перемещении объекта в режимах пуска и торможения [5, 6].

Анализ способов построения и реализации систем управления ПТМ показал, что задачей управления в существующих манипуляторах в основном является регулирование скорости, а настройка их систем управления чаще всего осуществляется по показателям переходного процесса, вызванным изменением управляющего воздействия [1]. Скорость перемещения и траектория движения объекта задаётся воздействием на устройство управления двигателя исполнительного механизма, поэтому при функционировании ПТМ возможны колебания в упругих элементах их механической части. Это повышает сложность управления манипулятором при необходимости точного позиционирования объекта, что в итоге приводит к снижению производительности [5].

### Предлагаемый способ управления

Система вертикального перемещения ПТМ может быть реализована с использованием в системе регулирования информации об усилии в устройстве подвеса объекта, его весе и внешних силовых воздействиях, прикладываемых к нему для перемещений [7, 8]. При этом двигатель должен развивать усилие, равное весу объекта, но противоположное по направлению. Для реализации таких систем необходимо иметь информацию о динамических нагрузках исполнительных механизмов, что требует применения высоконадёжных в эксплуатации датчиков измерения усилий и реализации в системе управления дополнительных контуров обратных связей. Такой способ управления нашёл широкое применение при создании силокомпенсирующих систем тренажёров для подготовки космонавтов и испытаний изделий космической техники [9–11].

Возникающие при этом упругие колебания исполнительного механизма и динамические нагрузки в механизмах ПТМ ограничиваются с помощью ЭП. Это становится возможным благодаря созданию с помощью электродвигателя дополнительного силового воздействия, определённым образом взаимодействующего с моментом в упругих элементах (УЭ) механических передач манипулятора [12]. В системах, обеспечивающих компенсацию статической нагрузки объекта, можно отметить ряд достоинств:

- удержание объекта на весу без применения тормоза;
- отсутствие блока задания скорости;
- возможность значительного уменьшения усилия оператора при перемещении объекта;
- точность позиционирования объекта при реализации такой системы управления зависит только от действий оператора.

Таким образом, система регулирования электропривода должна обеспечивать с высокой точностью поддержание в элементах исполнительного устройства усилия, равного силе тяжести, при различных прикладываемых к объекту силовых воздействиях при манипулировании.

Реализованная таким способом система регулирования усилий (СРУ) позволяет осуществлять перемещения обезвешенного объекта в вертикальной плоскости за счет прикладываемой к нему незначительной силы  $F_b$ , создаваемой оператором. В этом случае задача электропривода механизма вертикальных перемещений заключается только в компенсации веса объекта и сил сопротивления его движению. Поэтому перемещение объекта в вертикальной плоскости будет определяться ошибкой регулирования усилия  $\delta_y$ , для минимизации которой необходимо решить задачи выбора рациональной структуры системы регулирования и синтеза параметров управляющих устройств. Обоснование рациональной структуры системы управления усилиями исполнительных механизмов сбалансированных манипуляторов приведено в [2, 13]. Для этого необходимо использовать соответствующее математическое описание электромеханической системы ПТМ.

**Математическая модель**

Динамические свойства двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) регулирования усилий можно исследовать с использованием математической модели, структурная схема которой приведена на рис. 1 [2, 14]. Здесь обозначено:  $T_d, T_M$  – механические постоянные времени инерционных масс двигателя и объекта, разделенных упругим элементом;  $T_c, T_d$  – постоянные времени, учитывающие эквивалентную жесткость и диссипативные свойства механических передач;  $\Omega_d, \Omega_M$  – угловые скорости двигателя и объекта;  $E_{\Pi}, E_d$  – ЭДС преобразователя и двигателя;  $M_0 = P_0 \rho$  – постоянная составляющая момента на валу двигателя, обусловленная весом  $P_0$  объекта;  $M_b = F_b \rho$  – момент, вызываемый внешними возмущающими силами  $F_b$ , прикладываемыми к объ-

екту;  $M_d, M_{тр}, M_y = F_y \rho$  – моменты двигателя, трения и в упругом элементе;  $F_y$  – усилие в упругих элементах механических передач;  $\rho$  – радиус привода;  $k_3, T_3$  – коэффициент передачи и электромагнитная постоянная времени двигателя;  $k_E, k_{дГ}$  – коэффициенты передачи обратной связи по противоЭДС двигателя и датчика тока;  $k_\epsilon, T_\epsilon$  – коэффициент усиления и постоянная дифференцирования положительной обратной связи по ускорению двигателя;  $W_{кЕ}(S), W_{дУ}(S), W_{рУ}(S), W_{рТ}(S), W_{\Pi}(S)$  – передаточные функции канала компенсации противоЭДС двигателя, датчика усилия, регулятора усилия, регулятора тока и преобразователя напряжения соответственно;  $U_{оу}, U_{от}, U_\epsilon, U_{кЕ}$  – сигналы обратной связи по усилию в упругом элементе, току, ускорению и ЭДС двигателя, пропорциональные силе тяжести объекта;  $U_3$  – сигнал задания на стабилизируемое усилие.

Параметры структурной схемы представлены в относительных единицах: скорости  $\Omega_d$  и  $\Omega_M$  определяются в долях от скорости холостого хода двигателя  $\Omega_0$ , ЭДС  $E_{\Pi}$  и  $E_d$  – от номинального напряжения двигателя, а моменты  $M_d, M_y, M_0$  и  $M_b$  – от номинального момента двигателя  $M_n$ .

Базовые значения задающего напряжения  $U_{зБ}$  и напряжения датчика тока  $U_{дТБ}$  выбраны так, чтобы статический коэффициент передачи цепи обратной связи по току был равен единице. Использование относительных единиц позволяет обобщить результаты исследований и упростить его, так как  $k_E = k_{дГ} = k_d = k_M = 1$ . При выбранных базовых значениях координат ЭМС имеем:

$$T_d = J_d \Omega_0 M_n^{-1}; \quad T_M = J_M \Omega_0 M_n^{-1};$$

$$T_c = c_y^{-1} \Omega_0 M_n; \quad T_d = b_y c_y^{-1},$$

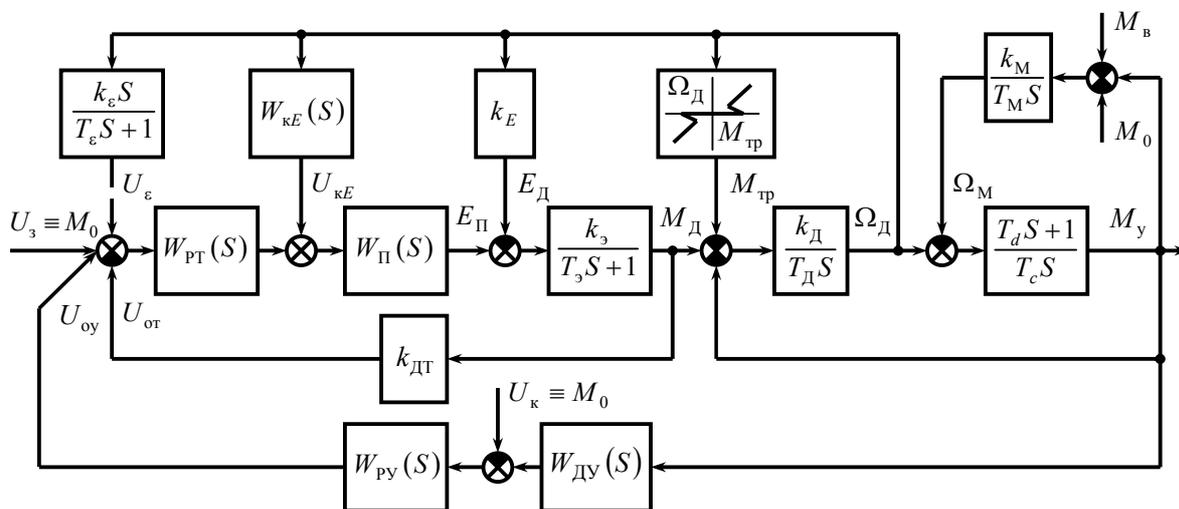


Рис. 1. Структурная схема ЭМС регулирования усилий в исполнительных механизмах ПТМ

## Электромеханические системы

где  $J_D, J_M$  – моменты инерции двигателя и объекта;  $c_y, b_y$  – коэффициенты, учитывающие эквивалентную жесткость и внутреннее вязкое трение механических передач.

Качество управления в исследуемой системе будем оценивать по ошибке регулирования усилия  $\delta_y$  и силе (моменту) трогания объекта  $F_{\text{трог}}$  [15]:

$$\delta_y = \frac{\Delta M_y}{M_B} = \frac{1 + \frac{T_M}{T_D - k_{KT}k_\epsilon}}{\frac{T_M}{T_D - k_{KT}k_\epsilon} (1 + k_{PY}k_{DU}k_{KT}) + 1}; \quad (1)$$

$$M_{\text{трог}} = F_{\text{трог}} \rho = \frac{M_{\text{тр}}}{1 - k_{PY}k_{DU}k_{KT}}, \quad (2)$$

где  $k_{PY}, k_{DU}, k_{KT}$  – коэффициенты передачи регулятора усилия, датчика усилия и замкнутого контура регулирования тока;  $k_\epsilon$  – коэффициент передачи обратной связи по ускорению, наличие которой приводит к уменьшению влияния механической постоянной электродвигателя, а также к улучшению демпфирующих свойств системы. Предельные значения коэффициента  $k_\epsilon$  предлагается определять исходя из условий устойчивости ЭМС с УС. По рекомендациям, приведенным в [18]:

$$k_\epsilon \leq T_D / k_{KT}. \quad (3)$$

Для обеспечения требуемого качества функционирования электромеханической системы ПТМ решим задачу синтеза регулятора усилия, который, осуществляя параллельную коррекцию ЭМС, обеспечит требуемое качество переходных процессов в исследуемой системе регулирования.

### Синтез оптимального регулятора усилия

Анализ технической литературы по исследуемой проблеме показал, что решение задачи синтеза целесообразно осуществлять с использованием методов оптимального управления, основанных на вариационном исчислении [16, 17]. При решении этой задачи необходимо учитывать реальные ог-

раничения, накладываемые на управляющее воздействие, случайный характер возмущающего воздействия, устойчивость синтезируемой системы управления к изменению параметров объекта. Синтез оптимального регулятора усилия будем осуществлять в линеаризованной ЭМС с учетом следующих допущений:

– влияние ЭДС двигателя полностью скомпенсировано каналом с передаточной функцией  $W_{KE}(S) = k_E / W_{II}(S)$ ;

– свойства замкнутого контура регулирования тока аппроксимированы апериодическим звеном первого порядка  $W_{KT}(S) = k_{KT} / (T_{KT}S + 1)$ ;

– каналы измерения усилия и ускорения безынерционные с передаточными функциями  $W_{DU}(S) = k_{DU}$ ,  $W_\epsilon(S) = k_\epsilon$ .

Составляющая момента двигателя  $M_0$ , определяемая весом объекта, постоянна, поэтому при синтезе регулятора усилия будем рассматривать задачу минимизации отклонения в упругом элементе  $\Delta M_y$ , вызываемого изменением внешнего возмущения  $\Delta M_B$ .

Введем обозначения:

$$\gamma = \frac{T_{DЭ} + T_M}{T_{DЭ}}; \quad \beta = \frac{T_M}{T_{DЭ} + T_M}; \quad \alpha = \frac{T_D + T_M}{T_{DЭ} + T_M};$$

$$T_y = \sqrt{\frac{T_D T_M T_c}{T_{DЭ} + T_M}}; \quad \mu = \frac{T_D}{T_{DЭ}},$$

где  $T_{DЭ} = T_D - k_{KT}k_\epsilon$  – значение эквивалентной механической постоянной времени двигателя в системе с обратной связью по ускорению двигателя.

С учетом принятых выше допущений исходную структурную схему СКС подъемно-транспортного манипулятора (см. рис. 1) для решения задачи синтеза оптимального регулятора усилия представим в виде, приведенном на рис. 2 [15].

Согласно структурной схеме, приведенной на рис. 2, момент в упругом элементе можно определить по выражению:

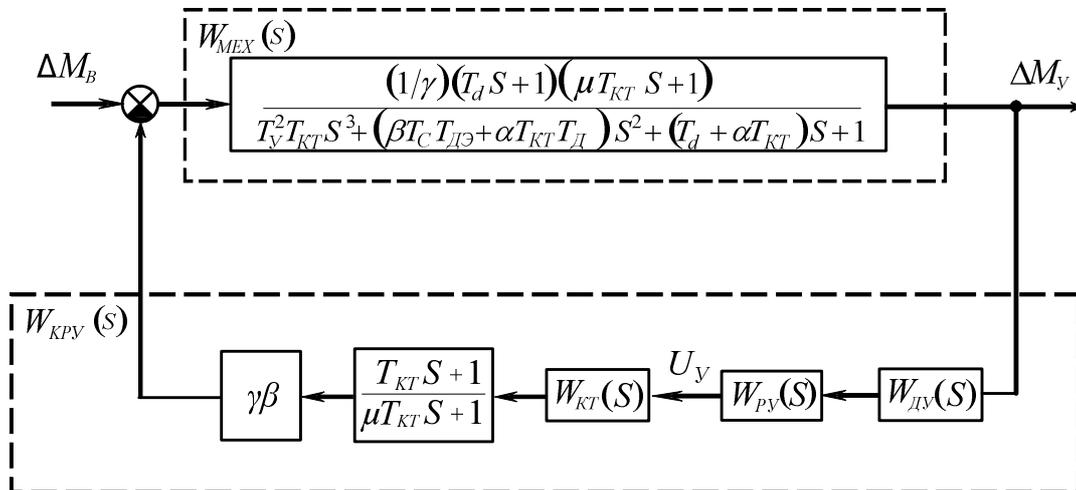


Рис. 2. Структурная схема СКС ПТМ

$$\Delta M_y(S) = \Delta U_y(S) W_{yy}(S) + \Delta M_b(S) W_{yb}(S), \quad (4)$$

где  $W_{yy}(S)$  и  $W_{yb}(S)$  – передаточные функции системы регулирования по управляющему и возмущающему воздействиям при разомкнутой обратной связи по усилию;  $\Delta U_y$  – сигнал управления на выходе регулятора усилия.

С учётом принятых обозначений определим

$$W_{yy}(S) = \frac{\Delta M_y(S)}{\Delta U_y(S)} = \frac{(T_d S + 1) k_{KT} \beta}{T_y^2 T_{KT} S^3 + (\beta T_C T_{DЭ} + \alpha T_{KT} T_d) S^2 + (T_d + \alpha T_{KT}) S + 1}; \quad (5)$$

$$W_{yb}(S) = \frac{\Delta M_b(S)}{\Delta M_B(S)} = \frac{(1/\gamma)(T_d S + 1)(\mu T_{KT} S + 1)}{T_y^2 T_{KT} S^3 + (\beta T_C T_{DЭ} + \alpha T_{KT} T_d) S^2 + (T_d + \alpha T_{KT}) S + 1}. \quad (6)$$

Синтезируемое управляющее воздействие, подлежащее определению, будет описываться выражением

$$\Delta U_y(S) = k_{ДУ} W_{PY}(S) \Delta M_y(S). \quad (7)$$

Подставив в уравнение (4) передаточные функции (5) и (6), получим:

$$A(S) \Delta M_y(S) = B(S) \Delta U_y(S) + C(S) \Delta M_b(S), \quad (8)$$

где  $A(S) = a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0$ ,  $B(S) = b_1 S + b_0$ ,

$$C(S) = c_2 S^2 + c_1 S + c_0;$$

$$a_3 = T_y^2 T_{KT}, \quad a_2 = \beta T_C T_{DЭ} + \alpha T_{KT} T_d,$$

$$a_1 = T_d + \alpha T_{KT}, \quad a_0 = 1;$$

$$b_1 = \beta T_d k_{KT}, \quad b_0 = \beta k_{KT};$$

$$c_2 = T_{KT} T_d \mu / \gamma, \quad c_1 = (\mu T_{KT} + T_d) / \gamma, \quad c_0 = 1 / \gamma.$$

Уравнение (8) с учетом управляющего воздействия (7) описывает поведение замкнутой системы регулирования усилия, в которой необходимо определить структуру и параметры передаточной функции регулятора  $W_{PY}(S)$ . Для решения задачи синтеза оптимального регулятора  $W_{PY}(S)$  в соответствии с требованиями функционирования ПТМ необходимо минимизировать средний квадрат (дисперсию) отклонения момента в упругом элементе за время работы  $t_p$  системы. Тогда при наличии ограничения, накладываемого на мощность управляющего воздействия  $\Delta U_y$ , критерий качества управления запишем следующим образом:

$$J = \lim_{t_p \rightarrow \infty} \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} (m^2 \Delta M_y^2 + \Delta U_y^2) dt, \quad (9)$$

где  $\Delta M_y = \beta k_{KT} \Delta U_y$ ;  $m^2 = 1/\lambda (\beta k_{KT} k_{ДУ})^2$ ;  $\lambda$  – коэффициент Лагранжа.

Определим передаточную функцию регулято-

ра усилия  $W_{PY}(S)$ , который доставляет минимум функционалу (9).

При оптимизации ЭМС по квадратичным критериям при вариации параметров объекта управления может возникнуть проблема потери устойчивости системы, поэтому при минимизации функционала (9) необходимо рассматривать не произвольные вариации комплексного коэффициента передачи  $W_{PY}(j\omega)$ , как обычно делается в вариационном исчислении, а лишь вариации, совместимые с устойчивостью исследуемой системы. Для гарантированного обеспечения устойчивости данной ЭМС с оптимальным регулятором введём дополнительные полиномы  $a(S)$  и  $b(S)$  так, чтобы полином  $Q(S) = A(S)a(S) + B(S)b(S)$  был Гурвицевым [13]. Исследования показали, что в рассматриваемой системе управления ПТМ это условие будет выполняться при  $a(S) = 0$ ,  $b(S) = 1$ , что соответствует  $Q(S) = B(S)$ .

Для определения свойств объекта и управляющего воздействия, описываемых полиномами  $A(S)$  и  $B(S)$ , с учетом ограничения, вводимого с помощью коэффициента  $m_1^2 = 1/\lambda = m\beta k_{KT} k_{ДУ}$ , факторизуем полином:

$$A(S)A(-S) + m_1^2 B(S)B(-S) = x^6 + z_4 x^2 + z_2 x + z_0 = G(S)G(-S), \quad (10)$$

$$\text{где } z_4 = \frac{a_2^2 - 2a_3 a_1}{a_3^2}; \quad z_2 = \frac{a_1^2 + m_1^2 b_0^2 - 2a_2 a_0}{a_3^2};$$

$$z_0 = \frac{a_0^2 + m_1^2 b_0^2}{a_3^2}.$$

Корни уравнения (10) можно вычислить на ПЭВМ или определить с помощью следующих аналитических формул:

$$p = -\frac{z_4^2}{3} + z_2; \quad q = 2 \left( \frac{z_4}{3} \right)^3 - \frac{z_4 z_2}{3} + z_0;$$

$$d = \left( \frac{p}{3} \right)^3 + \left( \frac{q}{3} \right)^2; \quad D = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{d}};$$

$$L = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{d}}; \quad x_{1,2} = \pm \sqrt{D + L - \frac{z_4}{3}};$$

$$x_{3,4,5,6} = \pm \sqrt{-\frac{D+L}{2} - \frac{z_4}{3} \pm j \frac{D-L}{2} \sqrt{3}}.$$

Тогда коэффициенты полинома  $G(S)$  будут равны:

$$g_3 = a_3 = T_y^2 T_{KT}; \quad g_2 = g a_3 = g T_y^2 T_{KT};$$

$$g_1 = \frac{g^2 a_3^2 + 2a_3 a_1 - a_2^2}{2a_3}; \quad g_0 = \sqrt{m_1^2 + 1};$$

$$g = x_2 + \text{Re}[x_4],$$

где  $x_2, x_4$  – корни уравнения (10), находящиеся в левой полуплоскости.

Выполнив преобразования исходной математической модели с учётом уравнений (7, 8, 10), найдем передаточную функцию оптимального регулятора усилия для исследуемой ЭМС:

$$W_{\text{PY}}(S) = -\frac{y_2 S^2 + y_1 S + y_0}{(T_d S + 1)(T_{3H} S + k_{3H})}, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} y_2 &= t^2 + g_2 t - T_Y^2 [\alpha T_{\text{КТ}} (T_{\text{ДЭ}} T_d + T_{\text{КТ}} T_d) + \\ &+ T_{\text{ДЭ}} (\beta T_c - g_2) - g_1 T_d T_{\text{КТ}}]; \\ y_1 &= (T_d + \alpha T_{\text{КТ}}) (t - g_2 T_d) + (g_0 - 1) T_Y^2 T_d T_{\text{КТ}} + \\ &+ (g_1 - \alpha - T_d) T_Y^2 T_{\text{ДЭ}}; \\ y_0 &= t + (g_0 - 1) T_Y^2 T_{\text{ДЭ}} - g_2 T_d; \\ t &= \alpha T_d T_{\text{КТ}} T_d + \beta T_c T_d T_{\text{ДЭ}}; T_{3H} = T_d T_{\text{КТ}} T_Y^2; \\ k_{3H} &= T_Y^2 T_{\text{ДЭ}} - t + g_2 T_d. \end{aligned}$$

Анализ выражения в числителе передаточной функции (11) показал, что его корни при реальном изменении параметров системы регулирования усилий всегда отрицательные вещественные. Знак минус в выражении (11) указывает на то, что обратная связь по моменту в упругом элементе должна быть отрицательной. Тогда передаточную функцию регулятора усилия можно записать в виде:

$$W_{\text{PY}}(S) = k_{\text{PY}} \frac{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}{(T_3 S + 1)(T_4 S + 1)}, \quad (12)$$

где  $k_{\text{PY}} = -\frac{y_0}{(T_Y^2 T_{\text{ДЭ}} - t + g_2 T_d) \beta k_{\text{КТ}} k_{\text{ДУ}}}$ ;

$$T_1 = -\frac{2y_2}{y_1 + \sqrt{y_1^2 - 4y_2 y_0}};$$

$$T_2 = \frac{2y_2}{-y_1 + \sqrt{y_1^2 - 4y_2 y_0}};$$

$$T_3 = \frac{T_{3H}}{k_{3H}} = \frac{T_d T_{3H} T_Y^2}{T_Y^2 T_{\text{ДЭ}} - t + g_2 T_d}; T_4 = T_d.$$

## Исследования системы с оптимальным регулятором

На примере сбалансированного манипулятора типа МП-100 грузоподъёмностью 100 кг выполним синтез параметров системы управления усилиями, которая должна обеспечить ошибку регулирования усилия  $\delta_y = 0,05$ , момент трогания  $M_{\text{трог}} = 0,003$ . Математическая модель исследуемой ЭМС имеет следующие параметры неизменяемой части:  $T_d = 0,1$  с;  $T_M = 0,01$  с;  $T_d = 0,0015$  с;  $T_c = 0,2$  с;  $T_{\text{КТ}} = 0,002$  с;  $k_{\text{КТ}} = k_{\text{ДУ}} = 1$ ;  $M_B = M_H$ ;  $\Omega_B = \Omega_0$ ;  $M_{\text{тр}} = 0,4$ . Исследования выполним при значении внешнего возмущающего воздействия  $M_B = 0,1$ .

По выражению (2), с учётом требуемого момента трогания  $M_{\text{трог}} = 0,003$ , определим необходимый коэффициент усиления регулятора усилия  $k_{\text{PY}} = 129$ , при котором обеспечивается заданный момент трогания. Ошибка регулирования усилия  $\delta_y$  при  $k_{\text{PY}} = 129$  в соответствии с выражением (1) будет равна 0,05. По полученным значениям  $k_{\text{PY}}$  и выражениям (11), (12) при значении коэффициента  $m_1 = 16$ , учитывающего энергетические ограничения электропривода, при котором  $k_{\text{PY}} = 129$ , определяем параметры регулятора усилия:

$$W_{\text{PY}}(S) = 129 \frac{(0,0073S + 1)(0,0095S + 1)}{(0,0020S + 1)(0,0015S + 1)}.$$

Эффективность предложенного управления в исследуемом манипуляторе проиллюстрирована на рис. 3, где приведены графики переходных процессов моментов в упругом элементе  $\Delta M_y$  и двигателе  $\Delta M_d$  в системе регулирования с главной обратной связью по скорости (1 и 3) и в системе регулирования усилий при  $k_{\text{PY}} = 129$  (2 и 4).

$\Delta M_d$ , о.е.  $\Delta M_y$ , о.е.

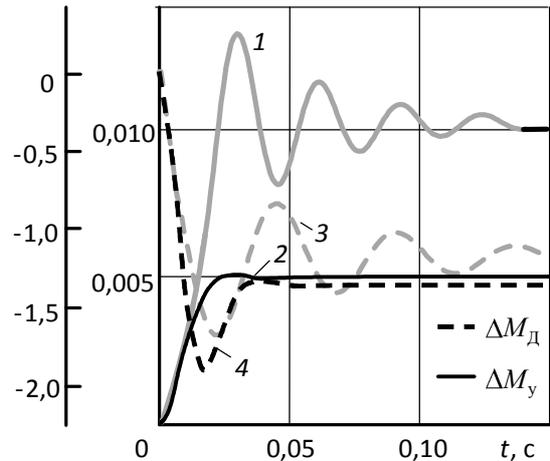


Рис. 3. Графики переходных процессов  $\Delta M_d(t)$  и  $\Delta M_y(t)$  при различных способах управления манипулятором МП-100

Анализ графиков, представленных на рис. 3, показывает, что использование в качестве системы управления механизма вертикальных перемещений сбалансированного манипулятора МП-100 системы управления усилиями и синтезированного регулятора (12) позволило существенно повысить качество функционирования манипулятора.

## Заключение

Выполненные исследования позволили определить преимущества применения подъёмно-транспортных манипуляторов с предложенной силокомпенсирующей системой управления:

1) возможность приложения незначительных усилий оператора для перемещений объекта;

2) осуществление активного демпфирования колебаний с помощью ЭП, возникающих при манипуляциях;

3) повышение производительности работы манипулятора, так как требуемая скорость перемещения и позиционирование объекта определяется непосредственно руками оператора.

Использование предлагаемого способа управления ПТМ при перемещении объектов особенно актуально:

1) при работе с крупногабаритными объектами, размеры которых затрудняют обзор при позиционировании и требуют участия сразу нескольких человек;

2) при манипуляциях с хрупкими объектами, где важна плавность скорости их перемещения с точки зрения производительности и сохранения целостности объекта;

3) при перемещениях объектов с частым изменением направления движения в пространстве ввиду наличия различных препятствий на траектории перемещения.

**Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания 2014 года при поддержке проекта № 2878 «Развитие теории и практики создания электротехнических систем тренажерных комплексов и мобильных объектов».**

### Литература

1. Сбалансированные манипуляторы / И.Л. Владов, В.Н. Данилевский, П.Б. Ионов и др.; под ред. П.Н. Белянина. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.

2. Сухенко, Н.А. Совершенствование систем управления сбалансированных манипуляторов / Н.А. Сухенко, Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 77–81.

3. Александров, М.П. Грузоподъемные машины: учеб. для вузов / М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.: ил.

4. Башарин, А.В. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

5. Пятибратов, Г.Я. Применение электропривода переменного тока при создании перспективных систем сбалансированных манипуляторов / Г.Я. Пятибратов, Н.А. Сухенко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 37–39.

6. Борцов, Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – 2-е изд. перераб. и доп. / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.: ил.

7. Пятибратов, Г.Я. Принципы построения и реализации систем управления усилиями в упругих передачах электромеханических комплексов /

Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – № 5. – С. 73–83.

8. Пятибратов, Г.Я. Создание и внедрение систем управления усилиями в упругих передачах и исполнения усилиями в упругих устройствах электромеханических комплексов / Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – № 1. – С. 45–56.

9. Пятибратов, Г.Я. Способы реализации и направления совершенствования тренажеров для подготовки космонавтов к работе в невесомости / Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко, В.П. Папирняк // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 70–76.

10. Состояние, проблемы, и пути совершенствования систем имитации невесомости для наземной отработки изделий космической техники / Г.Я. Пятибратов, В.П. Папирняк, В.Г. Полежаев, А.И. Супчев // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Технические науки. – 1995. – № 3–4. – С. 39–49.

11. Кравченко, О.А. Создание и опыт эксплуатации силокомпенсирующих систем, обеспечивающих многофункциональную подготовку космонавтов к работе в невесомости / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 42–47.

12. Пятибратов, Г.Я. Активное демпфирование электроприводом упругих колебаний исполнительных механизмов сбалансированных манипуляторов / Г.Я. Пятибратов, И.В. Хасамбиев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2007. – № 4. – С. 55–61.

13. Пятибратов, Г.Я. Принципы построения и способы реализации электромеханических систем сбалансированных манипуляторов с упругими исполнительными механизмами / Г.Я. Пятибратов, Н.А. Сухенко, И.В. Хасамбиев // АЭП 2007: тр. V Междунар. (XVI Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу, Санкт-Петербург, 18–21 сент., 2007 г. – СПб., 2007. – С. 81–84.

14. Сухенко, Н.А. Пути и способы оптимизации структуры и параметров электромеханических систем компенсации силы тяжести / Н.А. Сухенко, О.А. Кравченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2003. – № 5. – С. 30–36.

15. Кравченко, О.А. Определение качества функционирования электромеханических стенов имитации невесомости / О.А. Кравченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 3. – С. 50–55.

16. Петров, Ю.П. Синтез оптимальных систем управления при неполностью известных возмущающих силах / Ю.П. Петров. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 292 с.

17. Кравченко, О.А. Синтез оптимального регулятора усилий в электромеханических системах с упругими связями / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – № 4. – С. 58–63.

18. Сухенко, Н.А. Совершенствование систем управления сбалансированных манипуляторов / Н.А. Сухенко, Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 77–81.

**Пятибратов Георгий Яковлевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.А. Платова, г. Новочеркасск; g.pyatibratov@mail.ru.

**Сухенко Николай Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.А. Платова, г. Новочеркасск; kolyt@mail.ru.

*Поступила в редакцию 17 июня 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2014, vol. 14, no. 4, pp. 67–75**

---

## ELECTROMECHANICAL FORCE COMPENSATION SYSTEMS OF LIFTING-TRANSPORT MANIPULATORS

**G.Ya. Pyatibratov**, *Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation, g.pyatibratov@mail.ru,*

**N.A. Sukhenko**, *Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation, kolyt@mail.ru*

The paper deals with hoist transport systems which require human contact with the movable object during their operation. The manipulator structures and their specifications are analyzed. The requirements to the electromechanical system of lifting-transport manipulators are articulated.

Given the limitations of the existing control systems, a new approach is proposed to building electric drive control systems of lifting-transport manipulators. Using the methods of optimal control, the synthesis of optimal force control in the electromechanical system with electric drive acceleration feedback was performed.

Using the mathematical model approach, manipulator MP-10-based studies were performed which confirmed the advantages of the proposed structure of the lifting-transport manipulator control system; this structure will allow improving the performance of MP-100 manipulator.

*Keywords: lifting-transport manipulator, optimal regulator, force controlling, electric drive.*

### References

1. Vladov I.L., Danilevskiy V.N., Ionov P.B. Belyanina P.N. (ed.) *Sbalansirovannyye manipulyatory* [Balanced Handling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 264 p.
2. Sukhenko N.A., Pyatibratov G.Ya. [Improvement of Management Systems of Manipulators of Balanced]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2010, no. 5, pp. 77–81. (in Russ.)
3. Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov N.A. *Gruzopod"emnyye mashiny* [Lifting Machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 400 p.
4. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskiy G.G. *Upravlenie elektroprivodami* [Control of Electrical Drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 392 p.
5. Pyatibratov G.Ya., Sukhenko N.A. [The Use of the AC Motor Drive when Creating a Balanced Perspective Systems Manipulators]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2011, no. 1, pp. 37–39. (in Russ.)
6. Bortsov Yu.A., Sokolovskiy G.G. *Avtomatizirovannyy elektroprivod s uprugimi svyazyami* [Automatic Electric with Elastic Constraints]. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 288 p.
7. Pyatibratov G.Ya. [Principles of Design and Implementation of Systems Management Efforts in Elastic Transmissions Electromechanical Systems]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1998, no. 5, pp. 73–83. (in Russ.)
8. Pyatibratov G.Ya., Kravchenko O.A. [Creation and Implementation of Management Systems Efforts in Elastic Gears and Actuators Electromechanical Systems]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2008, no. 1, pp. 45–56. (in Russ.)
9. Pyatibratov G.Ya., Kravchenko O.A., Papirnyak V.P. [Methods and Ways of Improving the Implementation of Simulators to Train Astronauts to Work in Weightlessness]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2010, no. 5, pp. 70–76. (in Russ.)
10. Pyatibratov G.Ya., Papirnyak V.P., Polezhaev V.G., Supchev A.I. [Status, Problems, and Ways to Improve the Systems for Weightlessness Simulation Ground Testing of Space Technology Products]. *Izvestiya Vuzov*

Severo-Kavkazskiy region. *Tekhnicheskie nauki* [News Universities. North Caucasus Region. Engineering], 1995, no. 3–4, pp. 39–49. (in Russ.)

11. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Ya. [Creating and Operating Experience Silokompensiruyuschih Systems Providing Multi-Functional Training Astronauts to Work in Weightlessness]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2008, no. 2, pp. 42–47. (in Russ.)

12. Pyatibratov G.Ya., Khasambiev I.V. [Active Damping of Elastic Vibrations of Electric Actuators Balanced Manipulators]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2007, no. 4, pp. 55–61. (in Russ.)

13. Pyatibratov G.Ya., Sukhenko N.A., Khasambiev I.V. *Printsipy postroeniya i sposoby realizatsii elektromekhanicheskikh sistem sbalansirovannykh manipulyatorov s uprugimi ispolnitel'nymi mekhanizmami* [Principles and Methods of Realization of Electromechanical Systems Balanced Manipulators with Elastic Actuators]. *AEP 2007, V Mezhdunar. (XVI Vseros.) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [V Intern. (XVI Russian.) Conf. by Automated Electric], St. Peterburg, 2007, September, pp. 81–84.

14. Sukhenko N.A., Kravchenko O.A. [Ways and Means to Optimize the Structure and Parameters of Electromechanical Systems Compensate Gravity]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2003, no. 5, pp. 30–36. (in Russ.)

15. Kravchenko O.A. [Determination of the Quality of Functioning of Electromechanical Stands Simulate Weightlessness]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2002, no. 3, pp. 50–55. (in Russ.)

16. Petrov Yu.P. *Sintez optimal'nykh sistem upravleniya pri nepolnost'yu izvestnykh vozmushchayushchikh silakh* [Optimal Control Systems with Incompletely Known Perturbing Forces], Leningrad, Leningrad University Publ., 1987. 292 p.

17. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Ya. [Synthesis of Optimal Control Efforts in Electromechanical Systems with Elastic Connections]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1998, no. 4, pp. 58–63. (in Russ.)

18. Sukhenko N.A., Pyatibratov G.Ya. [Improving Management Systems Balanced Manipulators]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2010, no. 5, pp. 77–81. (in Russ.)

Received 17 June 2014