

А. Г. ГУРКО, к. т. н., И. Г. КИРИЧЕНКО, д. т. н.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОГИДРОПОДЪЕМНИКА

**Введение.** При проведении монтажных, ремонтных, отделочных и прочих работ широко используются автогидроподъемники (АГП), которые, фактически, представляют собой установленные на транспортное средство многозвенные механизмы (манипуляторы), состоящие из ряда кинематических пар, обеспечивающих вращательные и поступательные движения. Поэтому важную роль для эксплуатационных организаций играет совершенствование АГП, направленное на повышение их безопасности, грузоподъемности и производительности, которое возможно обеспечить путем внедрения систем автоматического управления (САУ) АГП.

**Постановка проблемы.** Одной из основных задач САУ АГП является планирование его движения с учетом эргономических и технологических требований, а также обеспечение этого движения с заданным качеством. Упрощенная структурная схема САУ АГП приведена на рис. 1.

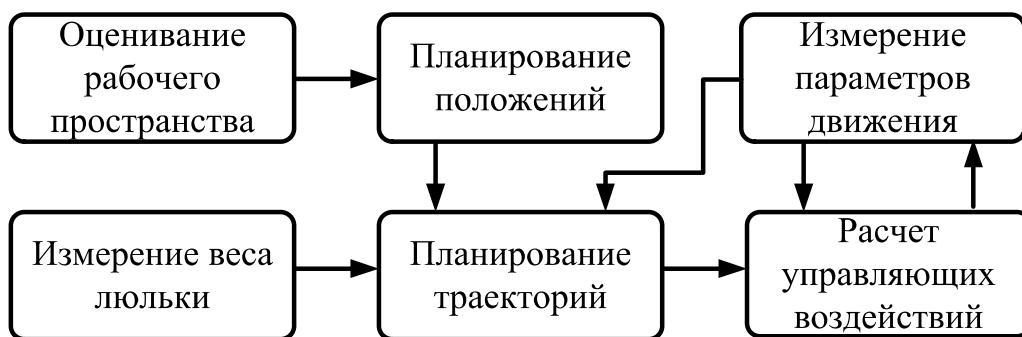


Рис. 1. Структурная схема САУ АГП.

При планировании положений необходимо совместить зоны обслуживания АГП с рабочим пространством таким образом, чтобы люлька АГП могла быть доставлена в заданную точку пространства с необходимой ориентацией [1].

На этапе планирования траекторий АГП определяются наиболее рациональные законы изменения угловых или линейных перемещений (обобщенных координат) его звеньев, их скоростей и ускорений. При этом необходимо учитывать конфигурацию рабочего пространства, наличие препятствий, а также ограничения, накладываемые конструктивными возможностями как звеньев АГП, так и их приводами. В процессе движения возможен перерасчет траекторий, например, если определенные ранее траектории по каким-то причинам невозможны реализовать.

Для обеспечения запланированного движения с заданными показателями качества необходимо определить управляющие воздействия на исполнительные гидроприводы АГП. Расчет управления может основываться на одной из двух стратегий. Первая из них – построение программного управления, когда требуется найти управление как функцию от времени, которое переведет АГП в заданное состояние, обеспечив, при этом, требуемое качество процесса. Вторая стратегия основывается на использовании обратной связи по отклонениям действительных режимов движения от заданных.

Следует, однако, отметить, что при синтезе управления может отсутствовать полная информация относительно внешних воздействий и текущего состояния АГП вследствие нестационарности гидромеханических процессов и характеристик рабочей жидкости, климатических условий и проч. В связи с этим, при управлении АГП предпочтительнее применять САУ с обратной связью.

В данной работе рассматриваются вопросы планирования тректорий движения АГП и управления этим движением с заданным качеством.

**Анализ публикаций.** К сожалению, в открытом доступе отсутствуют публикации, касающиеся управления АГП, в тоже время существует значительное число работ, посвященных моделированию и управлению строительными и дорожными машинами с многозвенным рабочим оборудованием [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Так, в [1] В.С. Щербаковым с соавторами получены модели движения и рассмотрены алгоритмы работы системы автоматизированного моделирования оптимальной траектории рабочего органа строительного манипулятора, к которому можно отнести и АГП. Однако при этом упор делался на автоматизацию проектирования машин, а вопросы управления рабочим процессом не рассматривались.

В [3] предложена адаптивная система управления однозвенным манипулятором с гидравлическим приводом и неизвестной постоянной нагрузкой. Однако при управлении АГП необходимо учитывать взаимное влияние его звеньев на параметры движения.

Многие работы, например, [4, 5, 6, 7] посвящены управлению рабочим процессом гидравлических экскаваторов. В частности, в [4] предложен основанный на использовании наблюдателя возмущений робастный регулятор со скользящим режимом, обеспечивающий управление напряжением в электрогидравлических приводах стрелы, рукояти и ковша, гарантирующее требуемое качество рабочего процесса. В то же время динамика звеньев рабочих органов экскаваторов намного сложнее чем звеньев АГП, особенно в процессе копания. При управлении экскаваторами приходится с иметь дело с неопределенными факторами, имеющих более широкие диапазоны изменения и более высокие скорости и ускорения. Поэтому законы управления АГП могут быть намного проще, чем для экскаваторов, и не требовать значительных вычислительных ресурсов.

Планирование траекторий. Как было отмечено выше, САУ АГП является сложной иерархической системой, при этом важным является уровень, осуществляющий планирование движения на основе кинематической модели АГП.

В данной работе будем рассматривать имеющийся на испытательном полигоне ХНАДУ АГП с двумя звеньями, совершающим вращательные движения (рис. 2). Следует сразу отметить, что представленные ниже результаты могут быть легко распространены на АГП с большим количеством звеньев как вращательного, так и поступательного типа.



Рис. 2. Двухзвенный АГП.

С кинематической точки зрения АГП можно рассматривать как двухзвеный рычажный механизм с разомкнутой цепью и вращательным движением (рис. 3). Основной задачей при управлении АГП является перемещение люльки в определенную точку пространства с требуемой ориентацией за заданное время при обеспечении гладкости траекторий скоростей и ускорений.

Положение и ориентация люльки АГП можно описать через положение и ориентацию связанной с ней системой координат  $x_2y_2z_2$  по отношению к базовой системе координат  $x_0y_0z_0$ , которую свяжем с платформой АГП. Системы координат  $x_iy_iz_i \ i=\overline{0,2}$ .

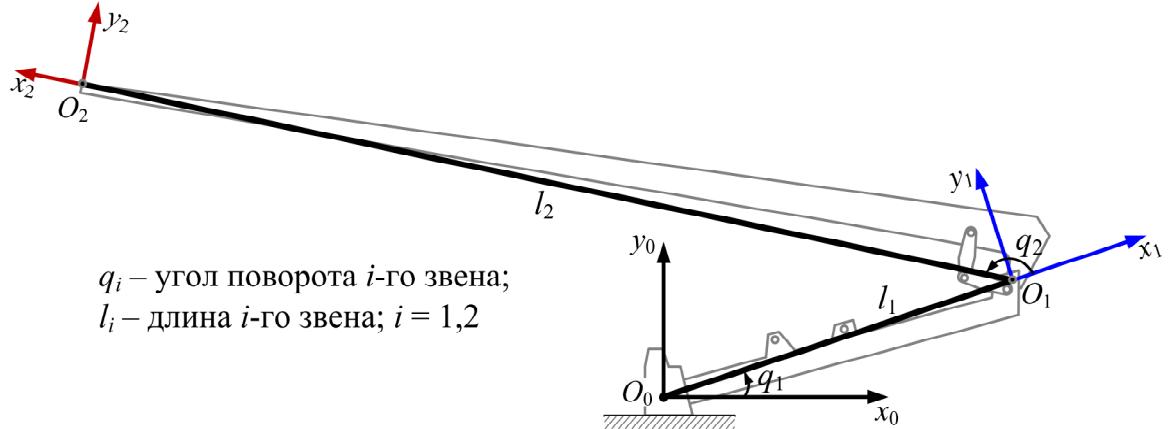


Рис. 3. Базовая и локальные системы координат АГП.

звеньев АГП (рис. 3) определены в соответствии с подходом Денавита-Хартенберга [8, 9], оси  $z_{i-1} \ i=1,2$  направлены вдоль осей вращения  $i$ -х сочленений. Параметры систем координат представлены в таблице 1, где  $\theta_i$  – угол поворота оси  $x_{i-1}$  вокруг оси  $z_{i-1}$ , при котором ось  $x_{i-1}$  совпадет с осью  $x_i$ ;  $d_i$  – расстояние от точки  $O_{i-1}$  до точки пересечения осей  $z_{i-1}$  и  $x_i$ ;  $a_i$  - расстояние между соседними началами координат;  $\alpha_i$  – угол поворота оси  $z_{i-1}$  вокруг оси  $x_i$  до её совпадения с осью  $z_i$ . В случае вращательного движения звеньев переменной величиной (обобщенной координатой) является параметр  $\theta_i$ . Поскольку при работе АГП угол поворота платформы обычно не изменяется, то платформу будем считать стационарной.

Таблица 1.

Параметры систем координат звеньев АГП

$i$	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
1	$q_1$	$-\pi/2$	$l_1$	0
2	$q_2$	0	$l_2$	0

Рассмотрим теперь решение задачи планирования траекторий АГП для случая, когда препятствия на пути звеньев АГП отсутствуют, т.е. в рамках позиционного управления.

Пусть люльку АГП необходимо перенести из некоторого начального положения  $q_0 = (q_{10}, q_{20})$  в базовой системе координат, в конечное  $q_f = (q_{1f}, q_{2f})$ . Тогда задача заключается в определении законов изменения  $q(t)$ ,  $\dot{q}(t)$  и  $\ddot{q}(t)$ , обеспечивающих одновременное плавное движение звеньев из положения  $q_0$  в положение  $q_f$  за время  $t \in [t_0, t_f]$  с краевыми условиями

$$\begin{cases} q(t_0) = q_0, q(t_f) = q_f, \\ \dot{q}(t_0) = 0, \dot{q}(t_f) = 0, \\ \ddot{q}(t_0) = 0, \ddot{q}(t_f) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Распространённый подход к построению траектории, переводящей манипулятор из положения  $q_0$  в  $q_f$  и удовлетворяющей условию гладкости, состоит в использовании интерполяционного полинома. Полиномом с минимальной степенью, удовлетворяющим условиям (1), является полином пятого порядка [9]:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5. \quad (2)$$

Производные первого и второго порядка от (2) также являются гладкими полиномами

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4; \quad (3)$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3. \quad (4)$$

Определить значения коэффициентов  $a_k$   $k=1,5$  можно, решив следующую систему

$$\begin{pmatrix} q_0 \\ \dot{q}_0 \\ \ddot{q}_0 \\ q_f \\ \dot{q}_f \\ \ddot{q}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 & 4t_0^3 & 5t_0^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_0 & 12t_0^2 & 20t_0^3 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

На рис. 4 а,б представлены положения АГП, соответствующие значениям  $q_0 = (0; -2,9671)$  рад и  $q_f = (1,309; -0,5236)$  рад, на рис. 5 а – траектория движения люльки в базовой системе координат  $x_0O_0z_0$ , а на рис. 5 б-г – соответственно траектории  $q(t)$ ,  $\dot{q}(t)$  и  $\ddot{q}(t)$  звеньев АГП. Длины звеньев АГП  $l_1 = 2,92$  м,  $l_2 = 7,2$  м. Время движения было принято  $t = 30$  с.

Как видно из рис. 4 а,б и рис. 5 а траектория движения АГП в базовой системе координат является гладкой, а за счет одновременности перемещения звеньев значительно сокращается время операции перемещения. Для сравнения, на рис. 4 в,г отображен один из вариантов движения АГП при ручном управлении.

На рис. 5 б–г приведены рассчитанные на основе решения уравнения (5) желаемые законы изменения присоединенных координат, их скоростей и ускорений. Полученные кривые также удовлетворяют требованию гладкости и условиям (1).

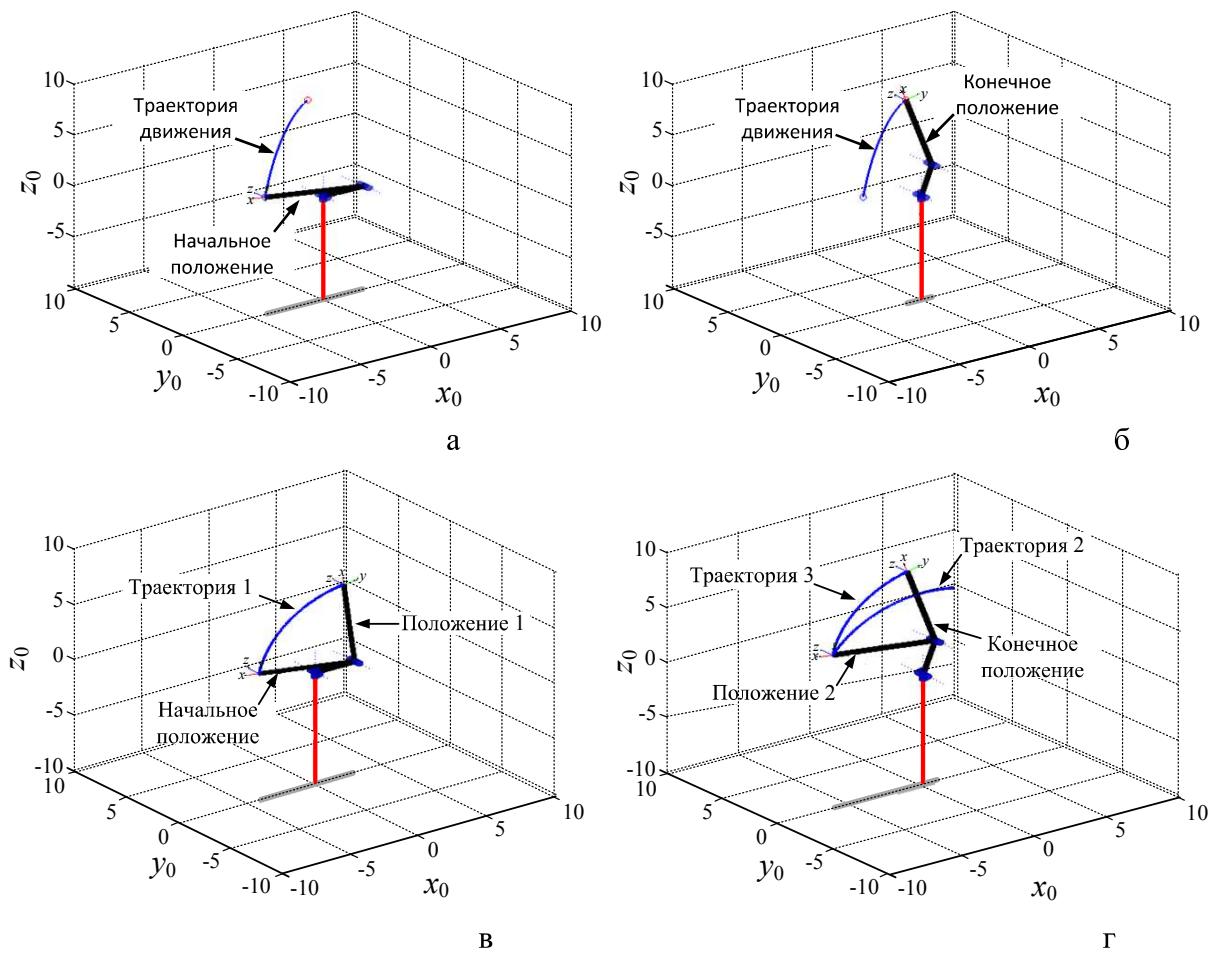


Рис. 4. Положения и траектории движения АГП: а, б – автоматическое управление; в, г – ручное управление.

Следует отметить, что при формировании векторов  $q(t)$ ,  $\dot{q}(t)$  и  $\ddot{q}(t)$  не учитывалась динамика звеньев и гидропривода, силы и моменты, развивающиеся которыми, ограничены по величине. Это может привести к увеличению ошибок слежения при управлении движением АГП. Для учета этих ограничений заданная линейная траектория разбивается на достаточно большое число узловых точек и

аппроксимируется каждый из участков между двумя последовательными узловыми точками [8, 9].

Уравнения динамики АГП. Рассматривая звенья АГП как жесткие тела при помощи метода Лагранжа-Эйлера [8] получим уравнения движения АГП:

$$M_1 = \left( m_1 r_1^2 + m_2 l_1^2 + m_2 r_2^2 + 2m_2 l_1 r_2 \cos(q_2) + I_1 + I_2 \right) \ddot{q}_1 + \left( m_2 r_2^2 + m_2 l_1 r_2 \cos(q_2) + I_2 \right) \ddot{q}_2 - 2m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_2^2 + (m_1 r_1 + m_2 l_1) g \sin(q_1) + m_2 r_2 g \sin(q_1 + q_2), \quad (6)$$

$$M_2 = \left( m_2 r_2^2 + m_2 l_1 r_2 \cos(q_2) + I_2 \right) \ddot{q}_1 + \left( m_2 r_2^2 + I_2 \right) \ddot{q}_2 + m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_1^2 + m_2 r_2 g \sin(q_1 + q_2). \quad (7)$$

где  $M_i$  – моменты, развивающиеся исполнительными гидроцилиндрами  $i$ -го звена АГП;  $m_i$  – масса  $i$ -го звена;  $r_i$  – расстояние от начала  $(i-1)$ -ой системы координат до центра масс  $i$ -го звена;  $I_i$  – момент инерции  $i$ -го звена относительно его центра масс;  $i = 1, 2$ .

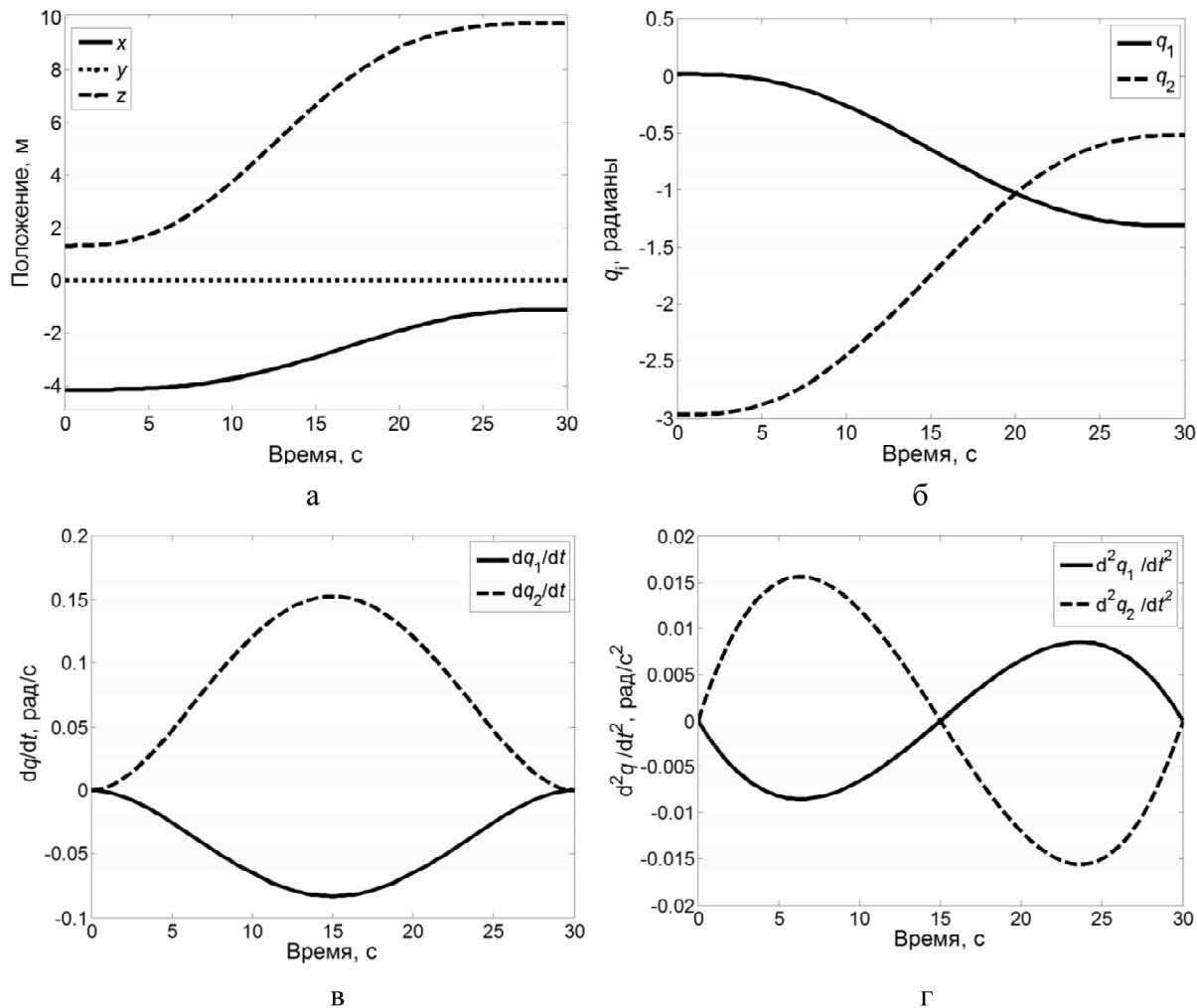


Рис. 5. Результаты решения задачи планирования траектории АГП. а – траектория движения люльки в системе координат  $x_0O_0z_0$ ; б – желаемые траектории углов поворота звеньев; в – желаемые траектории скоростей; г – желаемые траектории ускорений.

Для целей управления более удобно представить уравнения (6)-(7) в компактной матричной форме:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = M, \quad (8)$$

$$\text{где } q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}; D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}; C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & 0 \end{bmatrix}; G(q) = \begin{bmatrix} G_1 g \\ G_2 g \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix};$$

$$D_{11} = m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + r_2^2 + 2l_1 r_2 \cos(q_2)) + I_1 + I_2; D_{12} = m_2 (r_2^2 + l_1 r_2 \cos(q_2)) + I_2;$$

$$D_{22} = m_2 r_2^2 + I_2; G_1 = (m_1 r_1 + m_2 l_1) \sin(q_1) + m_2 r_2 \sin(q_1 + q_2); G_2 = m_2 r_2 \sin(q_1 + q_2);$$

$$C_{11} = -m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_2; C_{12} = -m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2); C_{21} = m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_1; g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Динамика гидропривода обычно моделируется системой нелинейных дифференциальных уравнений 6-го порядка [10]. Однако, при использовании сервоклапанов с широкой полосой пропускания, можно ограничиться линейной моделью 3-го порядка [11]:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + b_i N(u_i) + f_i P_i, i=1,2, \quad (9)$$

$$\text{где } A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B_{ci}/m_{ti} & S_{ci}/m_{ti} \\ 0 & 4S_{ci}\beta/V_{mi} & 4K_{ci}\beta/V_{mi} \end{bmatrix}; b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 4K_{qi}\beta/V_{mi} \end{bmatrix}; f_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_{ti} \\ 0 \end{bmatrix}; x_i \text{ – вектор}$$

состояния модели  $i$ -го привода;  $u_i$  – вход  $i$ -го привода (ток катушки золотника);  $P_i$  – вектор усилия привода, действующего в  $i$ -й степени подвижности АГП;  $N(u_i)$  – нелинейность типа амплитудного ограничения с зоной нечувствительности;  $B_{ci}$  – коэффициент вязкого трения;  $S_{ci}$  – площадь поршня;  $m_{ti}$  – масса поршня со штоком;  $\beta$  – коэффициент сжатия масла;  $V_{mi}$  – рабочий объем цилиндра;  $K_{ci}$  – крутизна характеристики следящего золотника;  $K_{qi}$  – коэффициент пропорциональности между потоком масла и током в катушке следящего золотника.

При этом подразумевается, что в качестве вектора состояния модели гидропривода взят вектор  $x_i = (l_i \quad \dot{l}_i \quad p_i)^T$ , где  $l_i$  – перемещение поршня;  $\dot{l}_i$  – скорость поршня;  $p_i$  – давление масла в цилиндре, а верхний индекс  $T$  означает операцию транспонирования.

Поскольку звенья АГП совершают вращательные перемещения, а гидропривод – поступательное перемещение, то связь между координатами состояния  $x_i$  модели привода и координатами состояния модели механической части АГП не линейна, а определяется из рис. 3 на основе очевидных геометрических соотношений.

Синтез закона управления. В качестве регулятора для САУ АГП будем использовать ПД - регулятор, являющийся одним из самых простых регуляторов при управлении движением манипуляторов и гарантирующий, при этом, достижение целей управления [12]. Закон управления АГП с ПД – регулятором описывается уравнением (10), а соответствующая структурная схема представлена на рис. 6:

$$u = K_p e + K_v \dot{e} + D(q) \ddot{q}_d + C(q, \dot{q}) \dot{q}_d + G(q), \quad (10)$$

где  $K_p$  и  $K_v$  – симметричные положительно определенные  $(2 \times 2)$ -матрицы коэффициентов регулятора;  $e = q_d - q$  – ошибка слежения по положению;  $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$  – ошибка слежения по скорости;  $q_d$ ,  $\dot{q}_d$ ,  $\ddot{q}_d$  – желаемые значения углов поворота, скоростей и ускорений АГП, соответственно.

Как видно из уравнения (10), для реализации закона управления необходимо измерять параметры  $q_d$  и  $\dot{q}_d$ . Для этих целей можно использовать современные микромеханические акселерометры.

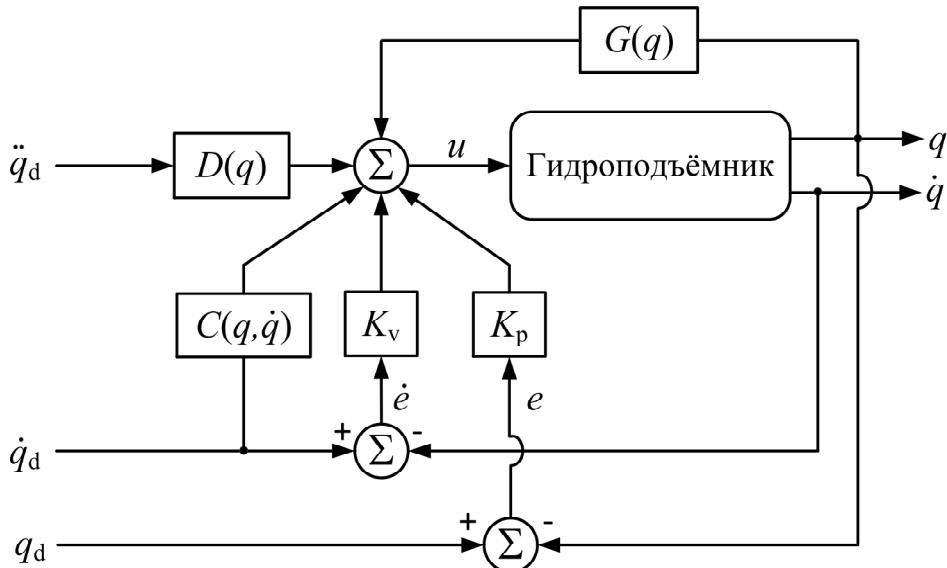


Рис. 6. Структура системы управления АГП с ПД – регулятором.

Подставив закон управления (10) в уравнение движения (8) АГП, получим уравнение для управления в замкнутой форме:

$$D(q)\ddot{e} + C(q, \dot{q})\dot{e} = -K_p e - K_v \dot{e}. \quad (11)$$

Выбрав в качестве вектора состояния вектор  $[e^T \quad \dot{e}^T]^T$ , уравнение (11) можно переписать в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e} \\ D(q)^{-1}[-K_p e - K_v \dot{e} - C(q, \dot{q}) \dot{e}] \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Это уравнение имеет одно положение равновесия  $[e^T \quad \dot{e}^T]^T = 0$ , поэтому если  $q(0) = q_d(0)$  и  $\dot{q}(0) = \dot{q}_d(0)$  выполняются условия  $q(t) = q_d(t)$  и  $\dot{q}(t) = \dot{q}_d(t)$  для всех  $t \geq 0$  [12]. Задачу определения значений элементов матриц  $K_p$  и  $K_v$  можно решить методом модального управления [13].

**Результаты моделирования.** Для проверки эффективности предложенного решения выполнено моделирование системы управления движением рассмотренного выше АГП, динамика которого описывается уравнением (8) со следующими параметрами:  $m_1 = 330$  кг,  $m_2 = 148$  кг,  $l_1 = 2,92$  м,  $l_2 = 7,2$  м. Динамикой гидропривода пренебрегалось. Желаемые траектории  $q_{di}$   $i=1,2$  движения звеньев АГП получены выше и приведены на рис. 5 б–г. Движение начиналось при начальных условиях  $q_1(0) = 0$  рад,  $q_2(0) = -2,9671$  рад,  $\dot{q}_i(0) = \ddot{q}_i(0) = 0$  ( $i=1,2$ ). В процессе моделирования измерялись как значения углов поворота звеньев  $q_i$  ( $i=1,2$ ), так и их скорости  $\dot{q}_i$  ( $i=1,2$ ). На звенья АГП действовали возмущения в виде аддитивных моментов, равных 5% от расчётных.

Рисунок 7 отображает эффективность отработки системой управления желаемых траекторий. Как показывает рис. 7, разработанный регулятор обеспечивает высокое качество управления: абсолютные значения ошибок слежения по положению не превышают значений  $1,5 \cdot 10^{-2}$  рад и  $0,9 \cdot 10^{-3}$  рад для первого и второго звена, соответственно, что составляет порядка 1% (рис. 7 а,б). Максимальные значения ошибок отработки желаемой скорости движения звеньев составляют не более  $10^{-2}$  рад/с для первого звена и  $1,6 \cdot 10^{-3}$  рад/с – для второго звена АГП (рис. 7 в,г).

Поскольку при моделировании полагалось, что параметры АГП известны с высокой точностью, то на практике следует ожидать ухудшения качества управления. Поэтому окончательную настройку регулятора необходимо выполнять перед введением САУ АГП в эксплуатацию непосредственно на объекте.

**Выводы.** Предложенная система управления обеспечивает плавное движение АГП из одной точки рабочего пространства в другое за заданное время с высокой точностью, причем алгоритмы, по которым выполняется планирование траекторий и

расчет управляющих воздействий достаточно просты и не требуют использования высокопроизводительных управляющих ЭВМ.

Внедрение рассмотренной системы управления позволит обеспечить безопасность и комфорт перемещаемых работников, а также повысить производительность выполняемых работ.

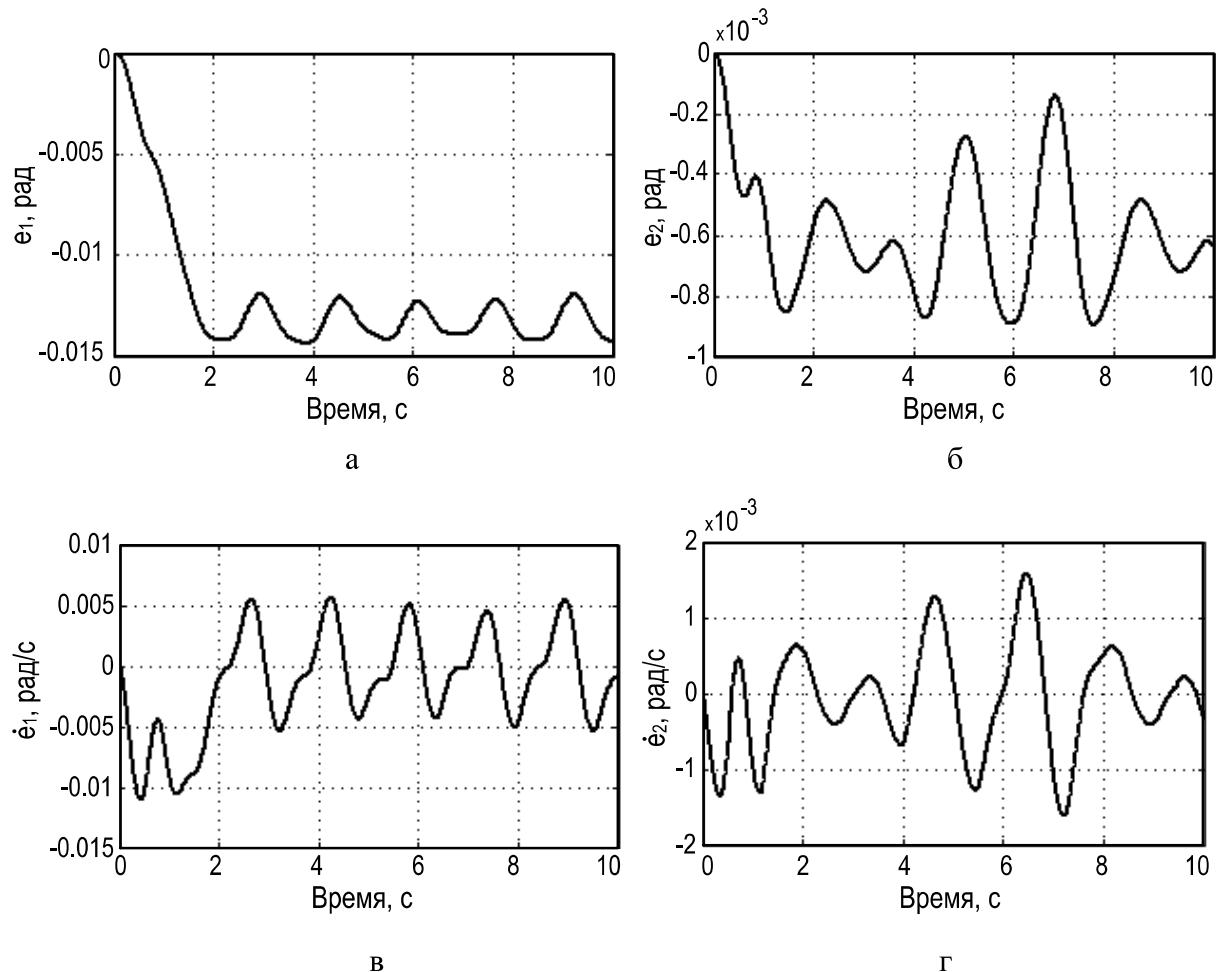


Рис. 7. Ошибки отработки желаемых траекторий движения АГП: а – ошибка по положению первого звена; б – ошибка по положению второго звена; в – ошибка по скорости первого звена; г – ошибка по скорости второго звена.

Полученные результаты могут быть распространены на управление АГП более сложных конструкций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков В. С. Автоматизация моделирования оптимальной траектории движения рабочего органа строительного манипулятора: монография / В. С. Щербаков, И. А. Реброва, М. С. Корытов – Омск: СибАДИ, 2009. – 106 с.

2. Щербаков В. С. Система автоматизированного моделирования стрелового грузоподъемного крана: монография / В. С. Щербаков, С. А. Зырянова, М. С. Корытов. – Омск: СибАДИ, 2009. – 106 с.
3. Yao B. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments / B. Yao, F. Bu, J. Reedy, G.C. Chiu // Transactions on IEEE/ASME Mechatronics. – 2000. – Vol. 5. – №. 1. – P. 79 – 91.
4. Ha Q.P. Impedance control of a hydraulically actuated robotic excavator / Q.P. Ha, Q.H. Nguyen, D.C. Rye, H.F. Durrant-Whyte // Automation in Construction. – 2000. – Vol. 9. – №. 5. – P. 421 – 435.
5. Jun Gu. Improved control of intelligent excavator using proportional-integral-plus gain scheduling // Gu Jun, D. Seward // Journal of Central South University. – 2012. – Vol. 19. – №. 2. – P. 384 – 392.
6. Wu Z. Design an Autonomous Excavation System for Hydraulic Excavators/ Z. Wu, K.Y. Sun, M. Song, M. Zheng // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 437. – P. 471 – 474.
7. Кириченко И. Г. Регулятор с вычисляемым моментом для управления рабочим оборудованием экскаватора / И. Г. Кириченко, А. Г. Гурко // // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Дн-вск.: ПГАСА, 2013. – Вып. 72. – С. 210 – 220.
8. Фу К. Робототехника / Фу К., Гонсалес Р., Ли К.; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
9. Зенкевич С. Л. Управление роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.
10. Šulc B. Non Linear Modelling and Control of Hydraulic Actuators / B. Šulc, J.A. Jan// Acta Polytechnica. – 2002. – Vol. 42. – N. 3. – P. 41 – 47.
11. Вукобратович М. Управление манипуляционными роботами: теория и приложения / М. Вукобратович, Д. Стокич. – М: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 384 с.
- 12 Kelly R. Control of Robot Manipulators in Joint Space / Kelly R., Santibanez V., Loria A. – Springer, 2005. – 452 p.
13. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 – Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. – 2004. – 616 с.