

Паршин Дмитрий Яковлеви, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника и автоматика» Ростовского государственного строительного университета, т.: 89185086649, e-mail: d.parshin@mail.ru;

Барценков Антон Александрович, аспирант кафедры «Автоматизация и электропривод станочных систем» Донского государственного технического университета, e-mail: fma.anton@mail.ru;

Сморгунова Марина Васильевна, преподаватель кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет».

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕТОНОУКЛАДЧИКОМ МАНИПУЛЯТОРОМ (рецензирована)

В статье изложены особенности и принципы управления бетоноукладочными манипуляторами. Сформулирован общий подход к построению кинематических и динамических моделей бетоноукладочных манипуляторов с учетом податливости звеньев. Рассмотрены особенности построения математических моделей манипуляторов с гидроприводами, а также сформулированы принципы планирования траекторий движения бетоноукладочных манипуляторов. Представлена структура устройства управления гидроприводами манипулятора.

Ключевые слова: бетонные работы, манипуляторы, автоматизация, управление движением, математические модели, гидропривод.

Parshin Dmitry Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Electrical Engineering and Automation, Rostov State University of Civil Engineering, tel: 89185086649, e-mail: d.parshin @ mail.ru;

Barschenkov Anton Alexandrovich, post graduate student of the Department of Automation and Machine Tools of the Don State Technical University, e-mail: fma.anton @ mail.ru;

Smorgunova Marina Vasylyjevna, lecturer of the Department of Construction and General Professional Disciplines of FSBEI HPI "Maikop State Technological University".

AUTO CONTROL OF PAVER MANIPULATOR (reviewed)

The article describes the characteristics and principles of paver manipulators. A general approach to the kinematic and dynamic models of manipulators considering compliance of units has been formulated. The features of the mathematical models of manipulators with hydraulic drives have been considered and principles of planning trajectories of the concreting manipulators have been defined. The structure of the control unit of hydraulic actuators of the manipulator has been presented.

Keywords: concrete works, cranes, automation, motion control, mathematical models, hydraulic drive.

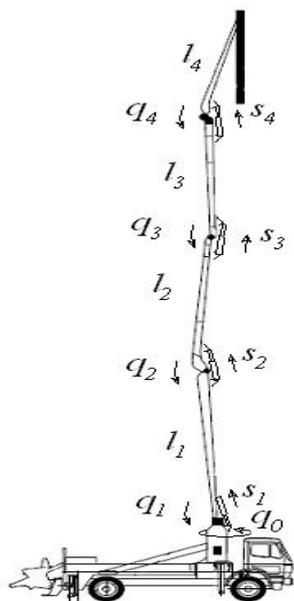


Рис. 1 – Бетоноукладочная стрела-манипулятор

Главным направлением повышения эффективности бетонных работ является внедрение комплексной механизации и автоматизации на основе использования достижений робототехники и микропроцессорной техники. Высокие экономические показатели определяют использование для распределения и укладки бетонной смеси шарнирно-распределительных стрел.

Анализ приведенных структур бетоноукладочных манипуляторов показал, что наибольший интерес представляют многозвенные стрелы-манипуляторы с гидроприводом, наиболее полно отражающих особенности и требования выполняемых операций (рис. 1). Структурной особенностью таких манипуляторов является наличие ветвящихся структур, обеспечивающих наилучшие кинематические и динамические характеристики.

Использование гидроцилиндров в приводных механизмах этих манипуляторов нарушает обычную цепочную структуру их построения. При проектировании таких манипуляционных механизмов следует проводить оптимизацию соотношения параметров кинематических структур, обеспечивающую получения квазилинейных характеристик: $q_i = f_1(s_i)$; $s_i = f_2(q_i)$.

Особенностью математических моделей строительных роботов является необходимость учета упругих деформаций звеньев, возникающих при воздействии динамических и ветровых нагрузок. В соответствии с принципом конечных разбиений такие манипуляторы можно рассматривать как совокупность последовательно упруго соединенных жестких тел. При переходе к такой структуре для деформируемых звеньев определяются точки, наиболее критичные к деформации (ТКД), которые характеризуются максимальным значением отношения предельного напряжения вдоль траектории движения к удельной деформации материала элемента конструкции. В этой точке звено манипулятора разбивается на два тела, соединенные шарниром. Введение в модель фиктивных степеней подвижности позволяет учесть смещения, обусловленные наличием упругих деформаций. В динамическую модель добавляются уравнения для обобщенных сил фиктивно введенных звеньев, параметры которых идентифицируются для наибольшего соответствия математической модели реальному объекту. Если не удается получить заданную точность модели, то производится поиск еще одной ТКД с последующим введением в модель дополнительной фиктивной степени подвижности.

В соответствии с изложенной концепцией учета упругих деформаций представим конструкцию манипулятора в виде четырех упругих звеньев, соединенных шарниром и жесткого пятого звена (рис. 2а). Так как основной нагрузкой манипулятора являются силы тяжести элементов и находящегося в системе раствора, то предельные напряжения возникают в основаниях звеньев, в местах крепления гидравлического привода. Учитывая это, произведем разбиение упругих звеньев на составляющие и добавим в точках разбиения фиктивные степени подвижности $q_7 - q_{10}$, показанные на структурной схеме модели бетоноукладочной стрелы (рис. 2б).

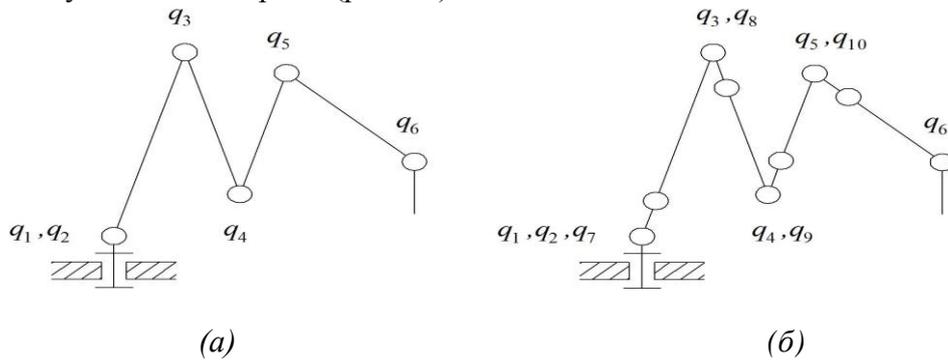


Рис. 2 – Структурные схемы манипулятора: а – исходная; б – с фиктивными степенями подвижности

Для удобства математического описания обобщенные координаты манипулятора разделяются на управляемые $q' = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)^T$ и обобщенные координаты, описывающие деформацию элементов стрелы $q'' = (q_7, q_8, q_9, q_{10})^T$, при этом $q = q' \cup q''$. Произведя разделение на управляемые и неуправляемые обобщенные координаты, получаем уравнения кинематической модели для скоростей и ускорений в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= G'(q, \Delta x) \cdot \dot{q}' + G''(q, \Delta x) \cdot \dot{q}''; \\ \ddot{x} &= G'(q, \Delta x) \cdot \ddot{q}' + G''(q, \Delta x) \cdot \ddot{q}'' + G(q, \dot{q}, \Delta x) \cdot \dot{q}, \end{aligned}$$

где $G'(q, \Delta x), G''(q, \Delta x)$ - матрицы преобразований систем координат; Δx - вектор координат конечного звена.

Для получения полной математической модели бетоноукладочного манипулятора с гидроприводами необходимо рассмотреть построение кинематической и динамической моделей механизмов привода с гидроцилиндрами. Кинематические модели рассматриваемых структур должны содержать уравнения связи обобщенных координат q_i с перемещениями гидроприводов s_i : $q_i = f_1(s_i)$, которые позволяют устанавливать зависимости между векторами \bar{x} и \bar{s} : $\bar{x} = f_2(\bar{s})$.

Для рассматриваемых структур искомые функции $q_i = f(s_i)$ легко получить на основе геометрического подхода. Для кинематической структуры гидропривода первого типа (рис. 3а) обеспечивающей подъем и опускание стрелы, эта взаимосвязь описывается уравнением вида:

$$q(s) = \arctg(a/b) + \arccos\left(\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - s^2}{2l_1l_2}\right) + \arctg(e/d) - \pi,\right.$$

где a, b, c, d, e – конструктивные параметры; $l_1 = \sqrt{a^2 + b^2}$, $l_2 = \sqrt{d^2 + e^2}$ – межосевые расстояния.

Данный тип структуры в первую очередь относится ко второй степени подвижности, где для удобства отчета обобщенной координаты q_2 удобно использовать угол γ , равный $\gamma = \theta + \pi/2 - \arctg(a/d)$. В этом случае обобщенная координата связана с перемещением привода зависимостью:

$$q(s) = \arctg(a/b) + \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - s^2}{2l_1l_2}\right) - \pi/2$$

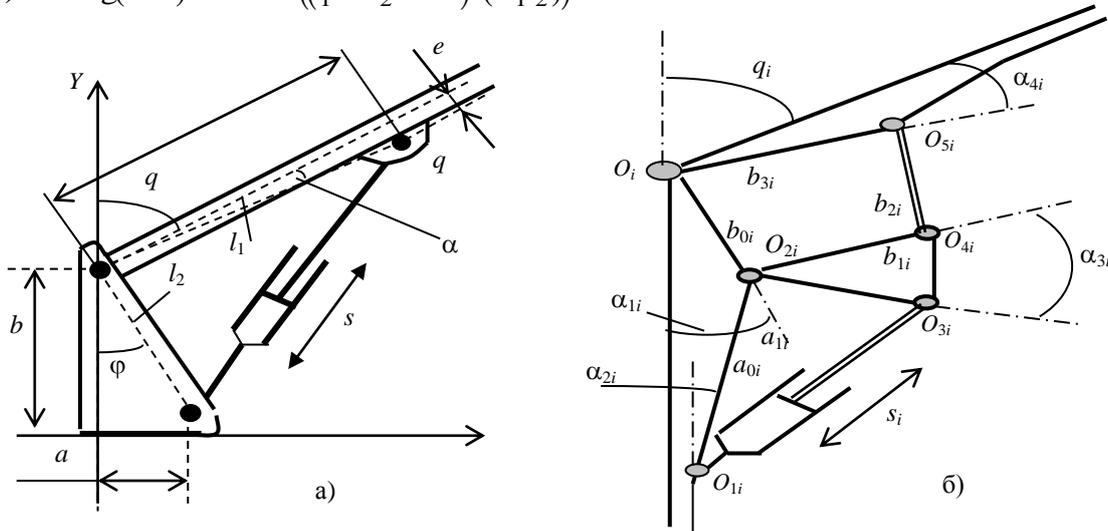


Рис. 3 – Расчетные схемы бетоноукладочного манипулятора с гидроприводом

Решение обратной задачи о положении для рассматриваемой структуры гидропривода на основе геометрического подхода включает уравнение связи $s_i = f_2(q_i)$, вида:

$$s(q) = \left(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos(\theta - \alpha - \varphi)\right).$$

Аналогичным образом находятся уравнения связи обобщенных координат q_i с перемещениями гидроприводов s_i : $q_i = f_2(s_i)$ для кинематических структур второго типа (рис. 3б), представляющих собой цепь Витта, с последовательно соединенными трех- и четырехзвенниками. Эти соотношения получаются путем предварительной записи выражений:

$$\varphi_{1i}(s) = \angle O_{1i}O_{2i}O_{3i} = \arccos\left(\frac{a_{0i}^2 + a_{1i}^2 - s_i^2}{2a_{0i}a_{1i}}\right);$$

$$\varphi_{2i}(s) = \angle O_iO_{2i}O_{4i} = \pi + \alpha_0 + \alpha_1 - \varphi_{1i}(s);$$

$$\varphi_{2i}(s) = \angle O_{2i}O_iO_{5i} = \arccos\left(\frac{d_i^2 + b_{0i}^2 - b_{1i}^2}{2b_{0i}d_i}\right) + \arccos\left(\frac{d_i^2 + b_{3i}^2 - b_{2i}^2}{2b_{3i}d_i}\right),$$

$$\text{где } d_i(s) = \sqrt{b_0^2 + b_1^2 - 2 \cdot b_0b_1 \cos(\varphi_1(s))}.$$

Используя эти выражения, записываются уравнения связи для обобщенных координат:

$$q_i(s) = \alpha_{1i} + \alpha_{4i} - \pi + \varphi_{3i}(s).$$

Для получения полных кинематических моделей рассматриваемых структур необходимы уравнения для скоростей и ускорений. Угловые и линейные скорости перемещения i -го звена выражаются через скорости $i-1$ -го звена:

$$\bar{\omega}_i = \bar{\omega}_{i-1} + (1 - \xi_i)\bar{e}_i q_i'; \quad \bar{v}_i = \bar{v}_{i-1} + \bar{\omega}_{i-1} \times \bar{r}_{i-1,i} + \bar{e}_i \cdot q_i',$$

где $\bar{r}_{i-1,i}$ – вектор, соединяющий оси степеней подвижности $i-1$ и i -ой; ξ_i – логический коэффициент, описывающий тип кинематической пары: вращательная – $\xi = 0$, поступательная – $\xi = 1$.

Используя теорему Кориолиса определяются линейные и угловые ускорения:

$$\bar{\varepsilon}_i = \bar{\varepsilon}_{i-1} + (1 - \xi_i) \cdot \bar{\omega}_i \times \bar{e}_i \cdot q'_i + (1 - \xi_i) \cdot \bar{e}_i \cdot \bar{q} ;$$

$$\bar{a}_i = \bar{a}_{i-1} + \bar{\varepsilon}_{i-1} \times \bar{r}_{i-1,i} + \bar{\omega}_{i-1} \times (\bar{\omega}_{i-1} \times \bar{r}_{i-1,i}) + \xi_i \cdot \bar{e}_i \cdot q''_i + 2\xi_i \cdot \bar{\omega}_i \times \bar{e}_i \cdot q'_i ,$$

где $\bar{\varepsilon}_{i-1}, \bar{a}_{i-1}, \bar{\varepsilon}_i, \bar{a}_i$, - вектора угловых и линейных ускорений $i-1$ и i -го звена манипулятора.

Линейные и угловые скорости как функций обобщенных скоростей и обобщенных координат записываются в виде:

$$\bar{\omega}_i = \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_i^j q'_j ; \quad \bar{v}_i = \sum_{j=1}^n \bar{v}_i^j q'_j ;$$

$$\bar{\omega}_i^j = \sum_{j=1}^n (1 - \xi_i) \bar{e}_j ; \quad \bar{v}_i^j = \bar{\omega}_i^j \times \bar{r}_{j,i} + \xi_j \bar{e}_j .$$

Аналогичным образом можно записать конечные выражения для ускорений:

$$\bar{e}_i = \sum_{j=1}^n (\bar{\omega}_i^j q''_j + (\sum_{k=1}^n (\bar{\omega}_i^k \times \bar{\omega}_i^j) q'_k) q'_j) .$$

Описание обобщенных скоростей и ускорений манипулятора удобно представить в виде векторно-матричного уравнения:

$$\bar{q}' = k_q^s \cdot \bar{s}' = \text{diag} \left\{ \frac{\partial f_s(s)}{\partial s} \right\} .$$

Продифференцировав это выражение, получим уравнение связи для ускорений:

$$\bar{q}'' = k_q^s \bar{s}'' + (k_q^s)' \bar{s}' = k_q^s \bar{s}'' + \text{diag} \left\{ \frac{\partial^2 f_s(s)}{\partial s^2} \right\} \cdot (\bar{s}')^2 .$$

Для структурной схемы первого типа (рис. 3а) уравнения связей обобщенных и приводных скоростей представляются в виде:

$$q'(s') = k_q^{(1)}(s) \cdot s' = \frac{s \cdot s'}{(4l_1^2 l_2^2 - (l_1^2 + l_2^2 - s^2)^2)^{1/2}} ;$$

$$s'(q') = k_s^{(1)}(q) \cdot q' = \frac{l_1 l_2 \sin(\alpha + \varphi - q) \cdot q'}{(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos(q - \alpha - \varphi))^{1/2}} .$$

Аналогично могут быть записаны уравнения связей обобщенных и приводных скоростей для структурной схемы второго типа (рис. 3б):

$$q'(s') = k_q^{(1)}(s) s' ; \quad s'(q') = k_s^{(1)}(q) q' .$$

Построение динамической модели манипулятора лучше выполнять на основе уравнений Лагранжа. Проведя разделение обобщенных координат на управляемые q' и введенные для имитации упругой деформации q'' , уравнение динамики представим в виде:

$$M' = D'(q) \ddot{q}' + \check{D}(q) \dot{q}'' + b'(q, \dot{q}) ;$$

$$M'' = \check{D}^T(q) \dot{q}' + D''(q) \dot{q}'' + b''(q, \dot{q}) ,$$

где M' - обобщенные силы, создающиеся приводами; M'' - обобщенные силы, имитирующие упругие смещения; $D'(q)$, $\check{D}(q)$, $D''(q)$ - матрицы динамики; $b'(q, \dot{q})$ - вектор кориолисовых и центробежных сил.

Для бетоноукладочного манипулятора с замкнутыми кинематическими цепочками гидроприводов баланс виртуальных сил равен:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{v=0}^{N_i} \{ m_{iv} (\ddot{\mathbf{r}}_{iv} - \bar{\mathbf{g}}) \delta \mathbf{r}_{iv} + (\mathbf{I}_{iv} \varepsilon_{iv} + \omega_{iv} \times \mathbf{I}_{iv} \omega_{iv}) \delta \gamma_{iv} \} = \sum_{i=1}^n \tau_i \delta q_i ,$$

где r_i - орт-вектор звена i с массой m и моментом инерции J в точке тяжести; $\bar{\mathbf{g}}$ - вектор

гравитационного взаимодействия; τ – приводной момент сил привода в i -м звене.

На основе этого уравнения можно получить различные выводы динамических уравнений манипулятора. Так для виртуального представления передвижения звеньев манипулятора, уравнения динамики следует представить в виде:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l=0}^{N_i} \{m_{kv} v_{kv} (\ddot{\mathbf{r}}_{kv} - \bar{\mathbf{g}}) + (\mathbf{I}_{kv} \boldsymbol{\varepsilon}_{kv} + \boldsymbol{\omega}_{kv} \times \mathbf{I}_{kv} \boldsymbol{\omega}_{kv}) \delta \gamma_{kv}\} = \sum_{i=1}^n \tau_k \delta q_k .$$

Для управления привода это уравнение необходимо преобразовать в координаты привода. Для их получения следует воспользоваться уравнениями баланса виртуальной работы в шарнирных координатах и уравнениями связи обобщенных координат и координат привода. В результате получим динамические уравнения в координатах привода:

$$\mathbf{M}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{h}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) + \mathbf{g}(\mathbf{s}) = \mathbf{F}_A ,$$

где $\mathbf{M}(\mathbf{s}) = \mathbf{k}_q^i \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_q^i + \mathbf{h}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) + \mathbf{g}(\mathbf{s})$, $\mathbf{h}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) = \mathbf{k}_q^i \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_q^i \dot{\mathbf{s}}^2 + \mathbf{k}_q^i \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{k}_q^i \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_q^i \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{k}_q^i \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{g}(\mathbf{s}) = \mathbf{k}_q^i \mathbf{g}(\mathbf{q})$.

Планирование траекторий движения бетоноукладочных манипуляторов определяется формой и планом возводимых зданий и сооружений. Задача построения траекторий движения сопла бетоноукладочной стрелы, сводится к описанию последовательности движений в плоскости $X_n Y_n$ параллельной плоскости $X_0 Y_0$ системы координат манипулятора. Координата z_n в пределах одного цикла укладки не меняется, а затем увеличивается на величину Δh , соответствующую шагу подъема опалубки. На рисунке 4 приведены примеры наиболее часто возводимых монолитных объектов, представляющие собой набор прямоугольников, либо окружностей. При возведении каркаса жилого дома (рис. 4а) необходимо на основании плана здания сформулировать массив координат точек P_1, P_2, \dots, P_{10} и определить последовательность обхода прямолинейных участков $P_i \rightarrow P_j$. Каждый участок описывается уравнениями вида:

- для участков параллельных оси $X_0 \rightarrow P_{jn}(x_{jn}, y_{jn}), P_{jk}(x_{jk}, y_{jk}), y = y_{jn} \vee y_{jk} \rightarrow x_{jn} \leq x \leq x_{jk}$;
- для участков параллельных оси $Y_0 \rightarrow P_{in}(x_{in}, y_{in}), P_{ik}(x_{ik}, y_{ik}), x = x_{in} \vee x_{ik} \rightarrow y_{in} \leq y \leq y_{ik}$.

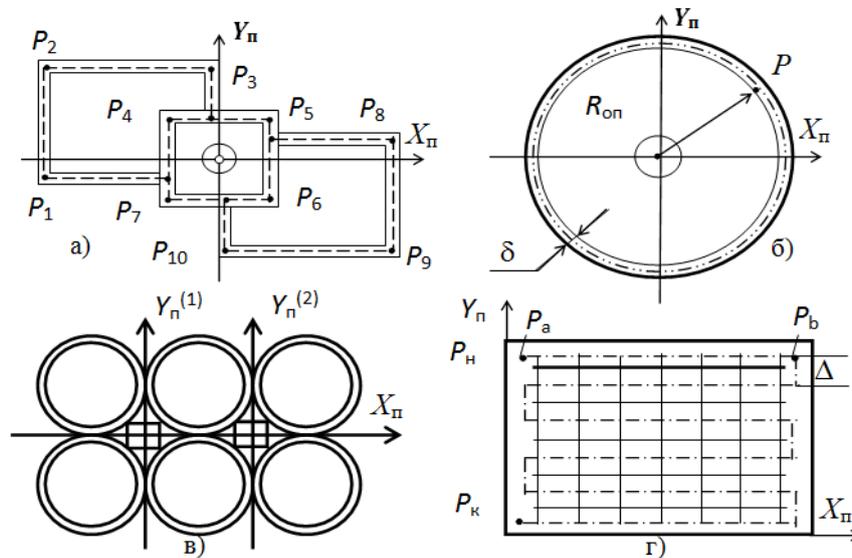


Рис. 4 – Планы монолитных объектов и траекторий укладки бетона

Планирование движений выполняется в обобщенных координатах на основе временного закона их изменения, формируемого для каждого i -го участка траектории $q_i(t) = [q_{1i}(t), q_{2i}(t), \dots, q_{ni}(t)]$. При этом основой для их формирования служат временные законы изменения положения и ориентации сопла и скорости его перемещения, которые описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} tr_i(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t)], \\ v_i(t) = [v_{xi}(t), v_{yi}(t), v_{zi}(t)], \\ \psi_i(t) = [q_i(t), \varphi_i(t), \beta_i(t)], \\ \omega_i(t) = [\omega_{\theta i}(t), \omega_{\varphi i}(t), \omega_{\psi i}(t)] \end{cases}$$

где $tr_i(t), v_i(t)$ – вектора положения и скорости в текущий момент времени t при движении на i -ом

участке траектории; $\psi_i(t), \omega_i(t)$ – вектора ориентации и угловой скорости на i -ом участке в момент времени t .

В случае прямолинейного участка траектории перемещение сопла при его равномерном движении со скоростью $v_i = [v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]$ описывается вектором:

$$tr(t) = \begin{cases} x_i + v_{xi}t & x_{1i} \leq x_i \leq x_{\hat{e}i} \\ y_i + v_{yi}t & \rightarrow y_{1i} \leq y_i \leq y_{\hat{e}i} \\ z_i + v_{zi}t & z_{1i} \leq z_i \leq z_{\hat{e}i} \end{cases}$$

где x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} - координаты начальной точки траектории; $x_{\hat{e}i}, y_{\hat{e}i}, z_{\hat{e}i}$ - координаты конечной точки траектории.

Управление движением сопла бетоноукладочного манипулятора по заданной траектории с требуемой скоростью осуществляется путем управления гидроприводами. Непременным условием управления положением поршня с подчиненным контуром регулирования является возможность непосредственного измерения одной или нескольких вспомогательных переменных. Для бетоноукладочных роботов в первую очередь следует стабилизировать рабочее давление. В качестве вспомогательной переменной удобно использовать усилие привода $F_{i\delta}^i = S_n^i P_{i\delta}^i$. Пренебрегая вязким трением в силу его малости по сравнению с силой сухого трения, уравнение динамики линейризованного гидропривода с контуром регулирования давления записывается в виде:

$$\Delta x = \frac{K_{\text{зад}} \Delta u - K_{\text{зад}} K_{\text{воз}} (T_{\Gamma} s + 1) \Delta F_{\text{H}}}{s \left(\frac{1}{\omega_{\Gamma}^2} s^2 + \frac{2d_{\Gamma}}{\omega_{\Gamma}} s + 1 \right)}$$

Использование отрицательной обратной связи по нагрузочному давлению позволяет улучшить демпфирование привода, не оказывая при этом влияния на характеристическую частоту контура и коэффициент усиления. Получить желаемые динамические характеристики гидропривода бетоноукладочного манипулятора позволяет введение в структуру управления ПИД-регулятора. Структурная схема звена манипулятора с гидроприводом, снабженным подчиненным контуром регулирования давления и ПИД-регулятором представлена на рис. 5.

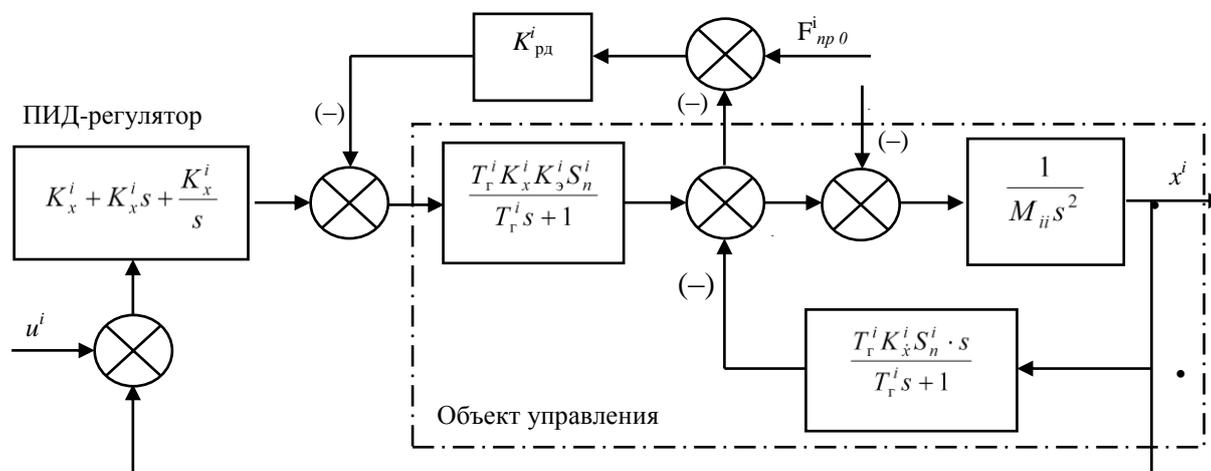


Рис. 5 – Структурная схема гидропривода с ПИД – регулятором и контуром регулирования давления

Используя закон управления ПИД-регулятора и уравнения динамики привода записываем передаточные функции гидропривода по задающему и возмущающему воздействиям:

$$W_{\text{зад}}(s) = \frac{x(s)}{u_{\text{уп}}(s)} = \frac{K_A (K_d s^2 + K_{\text{п}} s + K_{\text{и}})}{a(s)}$$

$$W_{\text{воз}}(s) = \frac{x(s)}{F_{\text{H}}(s)} = \frac{-s \cdot (T_{\Gamma} s + K_{\text{гп}} K_{\text{рд}} + 1)}{a(s)}$$

где $K_{\text{п}}, K_{\text{д}}, K_{\text{и}}$ - коэффициенты передачи ПИД-регулятора по пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющим.

Главная проблема при управлении бетоноукладочными роботами с гидроприводом заключается в

неопределенности параметров. Поэтому представляет интерес использование управления по положению с предварительной компенсацией динамики робота. Управление реализуется по принципу децентрализации с регулированием действующих между степенями подвижности динамических сил, обусловленных моментами инерции, кориолисовыми моментами и гравитационными силами. Для получения лучших динамических характеристик бетоноукладочных роботов при движении вдоль референсной траектории на основе динамической модели вычисляются корректирующие воздействия для каждой обобщенной координаты. Необходимые усилия перемещения приводной системы манипулятора, обеспечивающие движения по заданной траектории с определенной скоростью, задаются управляющими воздействиями, которые вырабатывается компенсирующим устройством. Они могут быть легко получены на основе использования линеаризованной модели приводной системы.

Литература:

1. Воробьев Е.И. Механика промышленных роботов: учебное пособие для вузов. В 3 кн. Кн. 1. Кинематика и динамика / Е.И. Воробьев, С.А. Попов, Г.И. Шевелева; под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. - М.: Высшая школа, 1998. - 304 с.
2. Паршин Д.Я. Математические модели строительных роботов / Д.Я. Паршин // Известия вузов. Сев.-кавказ. регион. Технические науки. - 2006. - №4. - С. 3-9. (Приложение).
3. Паршин Д.Я. Теоретические основы и практическое применение строительных роботов и мехатронных комплексов: монография / Д.Я. Паршин. - Ростов н/Д: РГСХМ, 2005. - 265 с.

References:

1. *Vorobyov E.I. Mechanics of robots: manual for technical schools. In 3 books. B. 1. Kinematics and Dynamics / Vorobyov E.I., Popov S.A., Sheveleva G.I. Ed. K.V. Frolov, E.I. Vorobyov. - M.: High school, 1998. 304 p.*
2. *Parshin D.Y. Mathematical models of building robots/ D.Y. Parshin / / Proceedings of universities. North-Caucasus region. Tech. sciences. - 2006. -№4. - P. 3-9.*
3. *Parshin D.Y. Theoretical basis and practical application of building robots and mechatronic systems: monograph. Rostov n / D, 2005. - 265 p.*