

УДК 621.865.8

**Поезжаева Елена Вячеславовна**

Poezzhaeva Elena Vyacheslavovna

кандидат технических наук, профессор,  
кафедра механики композиционных материалов и конструкции,  
аэрокосмический факультет,  
Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет,  
г. Пермь, Российская Федерация

**Закиров Евгений Аликович**

Evgeniy Zakirov Alikovich

студент, кафедра автомобилей и технологические машины, автодорожный  
факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет,  
г. Пермь, Российская Федерация

**Малёв Максим Валерьевич**

Maxim Malev Valerievich

студент, кафедра автомобилей и технологические машины,  
автодорожный факультет, Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет,  
г. Пермь, Российская Федерация

## **ДИНАМИКА РОБОТА ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА**

### **THE DYNAMICS OF THE ROBOT WHEN PLANNING THE TRAJECTORY FOR DIAGNOSING IN-LINE SPACE**

**Аннотация:** В газовой промышленности транспортировка газа один из самых важных аспектов этой отрасли. Для того чтобы поддерживать газопроводы в исправном состоянии необходимо периодически их диагностировать, в связи с этим был разработан робот который способен диагностировать внутритрубное пространство.

**Annotation:** In the gas industry, gas transportation is one of the most important aspects of the industry. In order to maintain the pipelines in good condition should

be periodically to diagnose them in connection with this robot has been developed which is able to diagnose in-line space.

**Ключевые слова:** Робот, динамика, траектория.

**Keywords:** The robot, dynamics, trajectory.

Для безопасной транспортировки газа необходимо постоянно поддерживать контроль над состоянием трубопровода. По всему миру контроль над газопроводами проводят с помощью поршней для внутритрубной диагностики, которые способны обнаружить коррозию и тонкие продольные трещины, которые приводят к разрыву трубопровода. Применение таких поршней в сложных участках магистрали и в трубопроводах компрессорных станций из-за сложной геометрии труб невозможно.

Для того чтобы произвести тщательную инспекцию всех труб и не проводить замену «вслепую», хорошо зарекомендовали себя самодвижущиеся роботы на гусеничном ходу, которые способны диагностировать тело трубы и сварные стыки изнутри. Такие роботы (рис.1.) оснащаются датчиками с электромагнитными акустическими преобразователями, а также модулями визуально-измерительного контроля.



*Рис.1.Робот для внутритрубного диагностирования*

С помощью модуля визуально-измерительного контроля робот регистрирует стыки труб, фитинги, а также производит поиск всех существенных отклонений, которые могли бы препятствовать дальнейшему движению робота. Очень важным аспектом является то, что робот (рис.2.) может двигаться как в прямом, так и обратном направлении, в случае если он встретит на своем пути объект, препятствующий его движению.



*Рис.2.Робот в трубе*

В связи со сложностью и существенной нелинейностью динамических характеристик данного манипуляционного робота проблема оптимального контурного управления такой системой является чрезвычайно трудной. Задача упрощается при её решении в два этапа. На первом этапе до начала движения осуществляется планирование оптимальной траектории как функции времени, а на втором в реальном времени осуществляется отслеживание полученного движения. Для того чтобы робот мог достаточно точно отследить сформированную траекторию, на этапе планирования необходимо располагать точным знанием динамики манипуляционной системы. Однако на практике инерционные характеристики объекта манипулирования часто бывают неизвестны. Ниже исследуются особенности задачи планирования траекторий при наличии такой неопределенности.

Динамика манипуляционного робота в тензорных обозначениях можно быть описана уравнением

$$\mathbf{u}_i = J_{ij} \ddot{q}^j + C_{ijk} \dot{q}^j \dot{q}^k + R_{ij} \dot{q}^j + \mathbf{g}_i \quad (1)$$

Где  $\mathbf{u}_i$ - $i$ -тая обобщенная сила;  $q^j$ - $j$ -тая обобщенная координата;  $J_{ij}$  – матрица инерции;  $C_{ijk}$ -массив кориолисовых коэффициентов. Матрица инерции  $J_{ij}$ , массив кориолисовых коэффициентов  $C_{ijk}$  и векторов  $\mathbf{g}_i$  являются функциями положения манипулятора и матрицы псевдоинерции объекта манипулирования, включающей в себя массу, первые и вторые моменты объекта манипулирования.

Желаемая геометрическая траектория задается в конфигурационном пространстве в параметрической форме. При такой форме представления появляется возможность выразить положения, скорости и ускорения в степенях подвижности и его производные по времени. Можно получить

$$\mathbf{u}_i = J_{ij} \frac{df^j}{d\lambda} \dot{\mu} + \left( J_{ij} \frac{d^2 f^j}{d\lambda^2} + C_{ijk} \frac{df^j}{d\lambda} \frac{df^k}{d\lambda} \right) \mu^2 + R_{ij} \frac{df^j}{d\lambda} \mu + \mathbf{g}_i \quad (2)$$

Где  $\mu \equiv \lambda$  – псевдоскорость. Если объект манипулирования имеет некоторую номинальную матрицу псевдоинерции  $I_N$ , то уравнение (2) можно представить в форме

$$\mathbf{u}_i = M_i(\lambda, I_N) \dot{\mu} + Q_i(\lambda, I_N) \mu^2 + R_i(\lambda) \mu + S_i(\lambda, I_N). \quad (3)$$

Где

$$M_i \equiv J_{ij} \frac{d^2 f^j}{d\lambda^2} \cdot \frac{df^j}{d\lambda}, Q_i \equiv J_{ij} \frac{d^2 f^j}{d\lambda^2} + C_{ijk} \frac{df^j}{d\lambda} \frac{df^k}{d\lambda}, R_i \equiv \frac{df^j}{d\lambda} \cdot R_{ij}, S_i \equiv \mathbf{g}_i(I_N).$$

Если инерционные характеристики объекта манипулирования отличаются от номинальных, то возмущенное уравнение динамики можно представить в виде

$$u_i = M_i(\lambda, I_N + \Delta I_N)\dot{\mu} + Q_i(\lambda, I_N + \Delta I_N)\mu^2 + R_i(\lambda)\mu + S_i(\lambda, I_N + \Delta I_N) \quad (4)$$

Для того чтобы требуемые моменты не превысили возможности приводов, нужно выбрать такие  $\mu$  и  $\dot{\mu}$ , что при отклонениях  $\Delta I_N$  в известных пределах величина требуемого момента  $u_i$ , определяемого выражением (4), остается реализуемой, т.е.

$$u_i^{min}(\lambda, \mu) \leq u_i \leq u_i^{max}(\lambda, \mu). \quad (5)$$

Установлены ограничения на скорость изменения этого момента как функции положения, скоростей и ускорений

$$|\dot{u}_i| = |F(q, \dot{q}, \ddot{q})| \leq K_i \quad (6)$$

Отклонение матрицы  $M_i$  при изменении нагрузки определяются выражением

$$\delta M_{ij}[(I)_N, \Delta I_N] = \delta M_i[(I)_N + \Delta I_N] - M_i[(I)_N] = \{J_{ij}[(I)_N + \Delta I_N] - J_{ij}[(I)_N]\} \frac{df^j}{d\lambda} \equiv \frac{\delta J_{ij}[(I)_N, \Delta I_N](df^j)}{d\lambda} \quad (7)$$

Можно получить

$$\delta M_i = \sum_j \frac{df^j}{d\lambda} Tr \left( \frac{\partial T_N}{\partial q^j} \Delta I_N \frac{\partial T_N^T}{\partial q^i} \right). \quad (8)$$

Подобным образом можно найти изменения коэффициентов и

$$\delta Q_i = Q_i[(I)_N + \Delta I_N] - Q_i[(I)_N] = \sum_j Tr \left( \frac{\partial T_N}{\partial q^j} \Delta I_N \frac{\partial T_N^T}{\partial q^i} \right) \frac{(df^j)^2}{(d\lambda)^2} + \dots$$

$$\delta S_i = \delta g_i = -G^T \frac{\partial T_N}{\partial q^j} \Delta I_N \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

Где  $G = [0 \ 0 \ g \ 0]^T$  - вектор силы тяжести. Используя полученные выражения, можно записать выражение для ошибки обобщенной силы

$$\delta u_i = \delta M_i \dot{\mu} + \delta Q_i \mu^2 + \delta S_i \quad (11)$$

В том случае, когда  $\Delta I_N$  известно, имеется возможность вычислить точное отклонение момента от номинального. На практике обычно известны только ограничения на значения  $\Delta I_N$ , в качестве которых можно использовать границы норм ошибки  $\Delta I_N$ . По этим данным нужно определить границы диапазона изменения  $\delta u_i$ . Поскольку  $\delta M_i, \delta Q_i$  и  $\delta S_i$  линейны по  $\Delta I_N$ , то  $\delta u_i$  также линейно по  $\Delta I_N$ . Если записать

$$\delta u_i = Z(\Delta I_N). \quad (12)$$

То задача сводится к максимизации (или минимизации) линейной по  $\Delta I_N$ , функции  $Z$  при ограничениях вида

$$\|\Delta I_N\| \leq E. \quad (13)$$

При решении задачи существенными являются два обстоятельства. Во-первых,  $\delta u_i$  линейно зависит от  $\Delta I_N$ . Во-вторых,  $\delta u_i$  зависит только от кинематики манипуляционного робота и от желаемых скоростей и ускорений и не зависит от номинальной динамики. В общем виде рассмотренная задача чрезвычайно сложна, однако, ограничивая класс используемых норм, можно ее существенно упростить и свести к задаче линейного программирования.

Требуется максимизировать  $Z(M) = \sum_j \sum_j \beta_{ij} M_{ij}$  при ограничениях вида  $\|M\| \leq E$  and  $M = M^T$ .

При планировании движений желаемая геометрическая траектория задается упорядоченной последовательностью точек  $(\lambda_{(k)}, q_{(k)})$ . Процесс формирования движения сводится к определению в каждой точке скорости  $\mu$  и ускорения  $\dot{\mu}$ . В дальнейшем для упрощения анализа рассматриваются только ограничения вида (5), зависящие только от положения и скоростей. Тогда эти ограничения можно представить как ограничения на  $\dot{\mu}$ , зависящие

от  $\lambda$  и  $\mu$ , или, что эквивалентно, как ограничения на  $d\mu/d\lambda$ . На графике  $(\lambda, \mu)$  каждой точке соответствует диапазон допустимых наклонов. Фазовая траектория в каждой точке фазовой плоскости должна проходить в направлении, лежащем внутри этого диапазона.

При дискретной аппроксимации, зная максимальный и минимальный наклоны. Можно определить допустимые изменения скорости в соседних интерполяционных точках. Задача планирования траектории наибольшего быстродействия требует, чтобы в начальной и конечной точках движения скорость была нулевой (или некоторой известной фиксированной величиной), а во всех промежуточных точках была максимально возможной с учетом ограничений на наклон фазовой траектории. Один из подходов к формированию такой фазовой траектории сводится к последовательному увеличению скоростей в каждой точке до тех пор, когда ни в одной точке нельзя будет увеличить скорость без нарушения ограничений

Робот демонстрирует безопасное прохождение отводов, в режиме реального времени предоставляет специалисту все необходимые данные, которые помогают ему вносить изменения в план контроля на основании найденных аномалий. Таким образом, робот для внутритрубного диагностирования позволяет не заменять всю линию трубопровода, а лишь отследить поврежденные участки, тем самым снижает стоимость и сроки замены.