

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТИВОМ РОБОТОВ НА ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© В. Ф. Калинин¹✉, В. А. Погонин²

¹ Кафедра «Электроэнергетика», kalinin@tstu.ru;

² кафедра «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: вероятность; классификация задач; мультиагентное управление роботами.

Аннотация: Проведена систематизация задач управления коллективом роботов-лаборантов. Задачи определения траекторий перемещения захватного устройства робота систематизированы на основе различных критериев: необходимости следования захватного устройства по заранее определенной траектории или же указания не всего маршрута, а лишь конечной точки его перемещения; определения траектории во времени, предполагающей нахождение в фиксированной точке в определенный момент, или параметрического задания, предполагающего последовательное прохождение захватным устройством определенной совокупности точек, но без фиксации момента времени этого прохождения; определения траектории, когда требуется не только нахождение захватного устройства в заданной точке пространства, но и его ориентация в пространстве; задач нахождения траектории в предопределенном виде или с учетом вероятности случайных флуктуаций в движении захватного устройства, обусловленных воздействием случайных помех. Рассмотрен ряд модификаций известных методов оптимального управления, позволяющих в некоторых случаях находить оптимальные траектории более эффективно (с меньшими временными потерями, более точно с использованием «технологичного» класса возможных траекторий).

Введение

Задачи управления роботами на химических предприятиях представляют собой сложную и специфическую область, требующую тщательного анализа и подхода [1 – 3]. Разнообразие работ, выполняемых роботами, таких как химический анализ веществ и производственной среды, очистка поверхностей оборудования и другие, а также опасные условия, в которых эти работы выполняются, делают эти задачи уникальными и сложными [4, 5].

Классификация задач оптимального управления

Математическое моделирование разнообразных задач оптимального управления позволяет в данной работе классифицировать их по нескольким основным видам.

Для удобства рассмотрения определим следующие обозначения. Программа управления (**П**) роботом представляет собой последовательность команд, которые подаются на приводы робота и гарантируют требуемое движение захватного уст-

ройства. Положение захватного устройства в трехмерном пространстве R^3 обозначим вектором $Y = (y_1, y_2, y_3)$. В случае, если положение захватного устройства характеризуется еще и ориентацией в пространстве, обозначим его несимметричным вектором $Y = (y_1, y_2, \dots, y_6)$ в шестимерном евклидовом пространстве R^6 .

Рассмотрим $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ как набор обобщенных координат, представляющих собой угловые и линейные перемещения захватного устройства. Примем, что кинематическое уравнение известно

$$Y = f(Q) \quad (1)$$

или

$$\hat{Y} = f(Q). \quad (2)$$

Также предположим, что известен вектор дифференциальных уравнений, который описывает динамическое поведение манипулятора [6, 7]. Этот вектор показывает, как изменяются обобщенные координаты манипулятора во времени под действием приложенных сил или моментов $U(t) = (u_1, \dots, u_n)$

$$M(Q(t), Q'(t)) + G(Q(t), Q'(t)) = U(t), \quad (3)$$

где $M(Q)$ – обобщенная матрица инерции; $G(Q(t), Q'(t))$ – вектор эквивалентных сил.

В рабочей зоне манипулятора $Y \in R^k$ ($k = 3$ или 6) есть точки, которые он занимает в определенные моменты времени $t \in [t_0, t_k]$. Их можно обозначить как L . В эти моменты манипулятор находится в начале или конце своего движения. Положение точек можно точно определить с помощью обобщенных координат Q

$$L = f(Q). \quad (4)$$

Определим множество точек $\hat{L}_n(t)$, которые в момент времени t выделяют в рабочей зоне область Y , исключающую попадание в нее точек тела манипулятора. Данное множество $\hat{L}_n(t)$ служит своего рода препятствием (в том числе движущимся) для манипулятора.

Отметим, что препятствием могут быть манипулятор другого робота, технологическое оборудование, трубопроводная система и др.

Отсутствие коллизий манипулятора с препятствиями отвечает условию непересечения множеств

$$L(Q(t)) \cap \hat{L}_n(t) = \emptyset, \text{ для } t \in [t_0, t_k]. \quad (5)$$

Выполнения условия (5) не хватает. Требуется, чтобы манипулятор имел достаточный запас надежности, обеспечивающий безопасное прохождение вблизи препятствий. Это требование можно представить, приведя определение расстояния $\rho = (x, \hat{L}_n)$ между точкой $x \in R^k$ и множеством $\hat{L}_n(t)$

$$\rho = (x, \hat{L}_n) = \min \rho(x, z), \quad (6)$$

где $x, z \in R^k$, $\rho(x, z)$ – расстояние между двумя точками в R^k .

В момент времени t манипулятор должен находиться на расстоянии от препятствия не менее чем на $r_{кр}$, запишем

$$\forall x \in \hat{L}_n(Q(t)): \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{кр}) \geq P_k, \quad (7)$$

где Вер – вероятность события; P_k – предельное значение вероятности.

В реальных задачах существует возможность уменьшить мощность множеств $\hat{L}_n(Q(t))$.

Действительно, нет необходимости проверять выполнение (7) для всех точек $x \in \hat{L}_n(Q(t))$. Всегда можно найти некоторое множество критических точек $\hat{L}_{кр} \subset \hat{L}_n(Q(t))$ – таких, что если точки $x \in \hat{L}_{кр}$ не проходят близко от препятствия, то остальные точки тем более удовлетворяют условиям зоны надежности от столкновения. При этом (7) заменяется условием

$$\forall x \in \hat{L}_{кр}(Q(t)) : \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{кр}) \geq P_k. \quad (8)$$

Следующим основополагающим условием является недопущения коллизии между звеньями манипулятора. Определим на звеньях манипулятора ключевые контрольные точки, несущие наибольший риск столкновений. Их расположение подбирается таким образом, чтобы исключение вероятности столкновения в этих точках гарантировало полную безопасность для всех остальных участков звеньев. Определение множества J таких точек не представляет значительной сложности, поскольку области повышенной опасности столкновений в промышленных роботах-манипуляторах, как правило, очевидны и легко выявляются.

Положение $J(Q)$ области R^k устанавливается заданием обобщенных координат Q . Поскольку траектория $Q(t)$ случайна, согласно (3), условие столкновения звеньев манипулятора может быть записано в виде

$$\forall (x, z) \in J(Q(t)) : \text{Вер}\{\rho_T(x, z)\} \geq r_{\min}, \quad (9)$$

где $r_{\min}$ – минимальная допустимая близость контрольных точек звеньев манипулятора.

Задачи определения траекторий перемещения захватного устройства могут быть систематизированы на основе различных критериев:

- необходимости следования захватного устройства по заранее определенной траектории или же указание не всего маршрута, а лишь конечной точки его перемещения;

- определения траектории во времени, предполагающей нахождение в фиксированной точке в определенный момент, или параметрического задания, предполагающего последовательное прохождение захватным устройством определенной совокупности точек, но без фиксации момента времени этого прохождения;

- определения траектории в R^3 или даже в R^6 , когда требуется не только нахождение захватного устройства в заданной точке пространства, но и его ориентация в пространстве;

- задач нахождения траектории, которые могут быть сформулированы в предопределенном виде или с учетом вероятности случайных флуктуаций в движении захватного устройства, обусловленных воздействием случайных помех.

Представим данные задачи более подробно.

Материалы и методы исследования

Задача $\tilde{A}$.

В данной задаче предполагается, что на временном интервале $[t_0, t_k]$ в пространстве R^3 задана траектория $Y(t)$, которая записывается следующим образом.

Для заданной функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$, определенной на некотором интервале времени $[t_0, t_k]$, требуется найти вектор-функцию U^* , которая будет удовлетворять в каждый момент времени этого интервала определенным условиям

$$\text{Вер}\{|Y(t) - F(Q(t))| \leq \sigma\} \geq P_y, \quad (10)$$

где P_y – предельное значение вероятности;

$$M(Q(t), Q''(t)) + G(Q(t), Q'(t)) = U(t), \quad (11)$$

удовлетворяются условия отсутствия столкновений:

$$\begin{aligned} \forall x \in \hat{L}_n(Q(t)) : \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{\text{кр}}) &\geq P_k; \\ \forall x \in \hat{L}_{\text{кр}}(Q(t)) : \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{\text{кр}}) &\geq P_n, \end{aligned} \quad (12)$$

конструктивные ограничения на обобщенные координаты и управляющие воздействия:

$$\begin{aligned} Q_{\min} &\geq Q(t) \geq Q_{\max}; \\ Q'_{\min} &\geq Q'(t) \geq Q'_{\max}; \\ U_{\min} &\geq U(t) \geq U_{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

и условия начального положения манипулятора:

$$Q(t_0) = Q_0; \quad Q'(t_0) = Q'_0, \quad (14)$$

где Q_0, Q'_0 – заданные величины.

Иначе говоря, в задаче $\tilde{A}$ необходимо отыскать программу изменения управляющих воздействий U^* манипулятора, находящегося в момент времени t_0 в состоянии (Q_0, Q'_0) , при котором захватное устройство с вероятностью не меньше заданной опишет траекторию, отличающуюся от заданной $Y(t)$ не больше чем на σ , и при этом звенья робота с гарантированной вероятностью не сталкиваются между собой и внешним препятствиями.

Задача $\tilde{A}_{\text{опт}}$.

В ряде случаев возможно существование не одной, а целого множества программ U^* , которые удовлетворяют условиям (10) – (14) и являются решением рассматриваемой задачи. В такой ситуации возникает необходимость постановки задачи поиска оптимальной программы управления, которая бы соответствовала условиям (10) – (14) и при этом минимизировала функционал вида

$$J = M \left[\int_{t_0}^{t_k} Q(Q, Q', U) dt \right], \quad (15)$$

где M – математическое ожидание.

В качестве критерия J в большинстве случаев отдают предпочтение энергетическим затратам, однако существует и альтернативный критерий – минимальное количество движений захватного устройства.

Задача $\tilde{B}$.

Цели и задачи $\tilde{B}$, $\tilde{B}_{\text{опт}}$ и $\tilde{A}$, $\tilde{A}_{\text{опт}}$, несмотря на то что подобны, имеют одно существенное различие: в задачах $\tilde{B}$ и $\tilde{B}_{\text{опт}}$ на временном отрезке $[t_0, t_k]$ фиксируются не только позиции захватного устройства в каждый момент времени, а также ориентация, то есть $Y_3(t) \in R^6$.

Итак, в задаче $\tilde{B}_{\text{opt}}$ необходимо определить программу изменения управляющих воздействий и найти закон изменения обобщенных координат $Q(t)$ на интервале $[t_0, t_k]$, который позволит осуществить заданное перемещение $Y_3(t)$. При этом следует учесть условия (10) – (14), а целевая функция (15) должна принимать минимальное значение.

Задача $\tilde{C}$.

Альтернативный тип задач $\tilde{A}$ и $\tilde{A}_{\text{opt}}$ – это задачи $\tilde{C}$ и $\tilde{C}_{\text{opt}}$, которые отличаются от предыдущих тем, что помимо указания траектории на отрезке $[t_0, t_k]$, необходимо также определить ориентацию захвата в конечный момент времени t_k , то есть $Y_3(t) \in Y \subset R^6$.

Задача $\tilde{D}$.

В условии задачи указываются координаты точки $Y_3(t) \in Y \subset R^3$, в которую перемещается захватное устройство в момент времени t_k .

Следовательно, задача $\tilde{D}$ состоит в том, чтобы найти вектор-функцию $U^*(t)$, определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в заданный конечный момент времени t_k удовлетворяется следующее требование

$$\text{Вер}\{|F(Q(t_k)) - Y_3| \leq \sigma\} \geq P_y, \quad (16)$$

и функции U^* и Q^* удовлетворяют (11) – (14).

Другими словами, требуется определить алгоритм изменения управляющих сигналов для манипулятора, который в момент времени t_0 находится в определенном положении $(Q_0, \dot{Q}_0)$. При этом необходимо обеспечить попадание захватного устройства в заданную точку Y_3 в момент времени t_k с заданной вероятностью. Важно также, чтобы звенья робота не сталкивались друг с другом и с внешними препятствиями с заданной вероятностью.

В ситуации, когда существует несколько альтернативных программ управления, может быть поставлена задача $\tilde{D}_{\text{opt}}$, в которой дополнительным условием является минимизация целевой функции вида (15).

В задачах $\tilde{D}$, $\tilde{D}_{\text{opt}}$ в качестве целевой функции часто используют время перелоа захватного устройства в положение Y_3 . Формально эту целевую функцию получают из (15) при $Q(Q, \dot{Q}, U) \equiv 1$. Такая целевая функция может быть использована, например, при управлении роботом-сборщиком химической аппаратуры, когда максимальная производительность робота во многом определяется минимизацией времени перемещения в позицию, в которой располагается комплектующее изделие, а также временем захвата этого изделия и перемещения его на место установки.

Параметрические задачи.

Задачи $\tilde{A}^\lambda, \tilde{B}^\lambda, \tilde{C}^\lambda$, подобные рассматриваемым $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$, характеризуются тем, что пространственное положение захватного устройства не коррелирует с определенным временным моментом. Траектория движения захватного устройства определяется как функция параметра λ , где $\lambda \in [0, \lambda_{\text{max}}]$.

Очевидно, в этом случае должна существовать некоторая монотонно возрастающая функция ψ , связывающая параметр λ и временной параметр t таким образом, что

$$\lambda = v(t); \quad 0 = v(t_0), \lambda_{\max} = v(t_k), \quad (17)$$

при которой выполняется требование

$$\text{Вер}\{|Y_3(v(t)) - F(Q(t))| \leq \sigma\} \geq P_y. \quad (18)$$

Задача $\tilde{A}_{\text{опт}}^\lambda$.

Необходимо для заданной на $\lambda \in [0, \lambda_{\max}]$ функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$ найти функцию $v(t)$, удовлетворяющую (17) и вектор-функцию U^* , определенную на $[t_0, t_k]$, при которых в каждый момент времени выполняются условия (18), (11) – (14) и минимизируется целевая функция (15).

Задача $\tilde{B}_{\text{опт}}^\lambda$.

Эта задача является вариантом задачи $\tilde{A}_{\text{опт}}^\lambda$, когда параметрически заданы не только положение, но и ориентация захватного устройства $Y_3(t) \in Y \subset R^6$, где $\lambda \in [t_0, t_k]$.

Таким образом, в задаче $\tilde{B}_{\text{опт}}^\lambda$ требуется найти такую функцию $v(t)$, удовлетворяющую (16), и такой закон изменения $U^*(t)$ и соответствующий закон изменения обобщенных координат $Q^*(t)$, при которых выполняются условия (18), (11) – (14) и минимизируется целевая функция (15).

Задача $\tilde{C}_{\text{опт}}^\lambda$.

Другим вариантом задач $\tilde{A}^\lambda, \tilde{A}_{\text{опт}}^\lambda$ являются соответственно задачи $\tilde{C}^\lambda, \tilde{C}_{\text{опт}}^\lambda$, отличающиеся тем, что кроме задания $Y(\lambda) \in R^3$ для $\lambda \in [0, \lambda_{\max}]$, дополнительно для $\lambda = \lambda_{\max}$ задается ориентация захватного устройства.

Отметим, что в ряде случаев, когда нет опасности столкновений звеньев манипулятора между собой, нет жестких требований выполнения заданной траектории или попадания в позицию «целевую точку» или в том случае, если могут быть использованы стандартные роботы с «жесткими» звеньями, целесообразно применять детерминированные задачи, как более простые, позволяющие за значительно более короткое время находить решения.

В этом случае целесообразно формулировать задачи «надежного» управления, под которым понимают задачи определения программ управления, гарантирующие выполнение технологических условий ограничений с вероятностью не ниже заданной.

Рассмотрим постановку задачи A^α построения надежных программ управления, соответствующую задаче $\tilde{A}$.

Задача A^α .

Необходимо для заданной на $[t_0, t_k]$ функции $Y(t) \in Y \subset R^3$ найти вектор-функцию $U^*(t)$, определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в каждый момент t выполняются условия:

$$Y_3(t) = F(Q(t)); \quad (19)$$

$$M(Q(t), \dot{Q}(t)) + G(Q(t), \dot{Q}(t)) = U(t) \quad (20)$$

и удовлетворяются условия отсутствия столкновений

$$\forall x \in \hat{L}_{\text{кр}}(Q(t)) : (\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{\text{кр}}, \quad (21)$$

а также конструктивные ограничения на обобщенные координаты и управляющие воздействия (18) и условия начального положения манипулятора (14).

Таким образом, задачи $\tilde{A}$ и A^α отличаются видом уравнения движения обобщенных координат соответственно (11) и (20) и заданием технологических условий соответственно (10), (12) и (21).

В настоящее время не существует методов решения задач типа A^α , в которых требуется гарантия вероятности выполнения технологических условий типа (10), (12). Будем такие задачи называть гарантированными задачами оптимального управления.

В работе предлагается алгоритм решения гарантированной задачи. Идея алгоритма – последовательное решение оптимизационных детерминированных задач, таких, что последовательность найденных оптимальных решений их сходится к оптимальному решению первоначальной детерминированной задачи.

Рассмотрим работу данного алгоритма на примере решения задачи $\tilde{A}$.

Блок 1 формирует детерминированную α -задачу, соответствующую первоначальной задаче гарантируемого управления. Для задачи $\tilde{A}$ соответствующая α -задача имеет следующий вид.

Необходимо для заданной на $[t_0, t_k]$ функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$ найти вектор-функцию U^* , определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в каждый момент времени выполняется следующее условие:

$$\begin{aligned} Y_3(t) &= F(Q(t)) ; \\ M(Q(t)) + G(Q(t), Q'(t)) &= U(t) ; \end{aligned}$$

удовлетворяются условия отсутствия столкновений:

$$\begin{aligned} \forall x \in \hat{L}_{\text{кр}}(Q(t)) : \rho(x, \hat{L}_n(t)) - r_{\text{кр}} &\geq \alpha_1 ; \\ \forall (x, z) \in \hat{K}_{\text{кр}}(Q(t)) : \rho_T(x, z) - r &\geq \alpha_2 , \end{aligned} \quad (22)$$

условия (13), (14) и минимизируется

$$J = M \left[\int_{t_0}^{t_k} Q(Q, Q', U) dt \right] .$$

Очевидно, что α -задача является детерминированной и отличается от задачи A^α условиями (21), (22). В том случае, если $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, α -задача становится тождественной задаче A^α .

Очевидно, что алгоритмы решения α -задач (блок 2) тождественны алгоритмам решения детерминированных задач A^α , B^α , C^α и др.

В блоке 3 проводится многократное решение вероятностного уравнения (11) при заданной функции $U^*(t)$, полученной в блоке 1 при решении α -задачи.

При интегрировании (11) каждый раз используется блок генерации случайных функций $\varepsilon(t)$ и $w(t)$. На основе множества просчетов (11) будет получено

множество реализаций $Q(t)$, и по ним в блоке 3 определены вероятности выполнения (10), (12).

Блоки 4 – 8 – диагностика нарушения ограничений и изменения констант α . Если какие-либо ограничения (10), (12), то есть вероятности нарушения соответствующих технологических условий недопустимо велики, в (22) увеличиваются значения α_1 или α_2 или двух сразу, после чего блок 2 решает новую α -задачу с более жесткими требованиями.

В том случае, если вероятности выполнения всех условий (10), (12) больше заданных, можно либо считать решение найденным, либо попытаться ослабить условия, то есть уменьшить α_1 и/или α_2 , что проводится в блоках 7, 8.

Эксперимент показывает, что последовательное решение α -задач сходится и решение задачи гарантированной оптимизации траекторий движения манипулятора происходит за приемлемое время. Предложенный алгоритм является эвристическим для задачи обеспечения траекторий роботов, хотя для некоторых частных задач подобный алгоритм получил теоретическое обоснование. Это обоснование получено для иных задач, но проведенные экспериментальные проверки показывают эффективность использования алгоритма для нахождения оптимальных гарантированных траекторий движения манипулятора робота.

Заключение

Для углубленного исследования теоретических аспектов управления многообразиями задач, выполняемых робототехническими системами, включая химический анализ веществ и производственной среды, очистку поверхностей оборудования и другие критически важные функции, а также работу в опасных условиях, предложена систематизация задач управления коллективом роботов-лаборантов. В рамках данной классификации особое внимание уделяется требованиям к манипулятору робота, который должен обладать необходимым запасом надежности для безопасного перемещения в пространстве, содержащем потенциальные препятствия, такие как манипуляторы других роботов, технологическое оборудование и трубопроводные системы. Кроме того, необходимо исключить возможность коллизий между звеньями манипулятора, что требует тщательной разработки алгоритмов и методов управления, обеспечивающих высокую степень предсказуемости и контроля в динамически изменяющихся условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Калинин, В. Ф. Управление мультиагентной системой роботов-лаборантов / В. Ф. Калинин, В. А. Погонин // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5-1. – С. 43–49. doi: 10.17513/snt.40003
2. Белоглазов, Д. А. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д. А. Белоглазов, А. Р. Гайдук, Е. Ю. Косенко. – Москва : Физматлит, 2015. – 305 с.
3. Воробьева, Н. С. Методы управления манипуляторами на базе трипода при выполнении технологических операций / Н. С. Воробьева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 3. – С. 3–12. doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-314
4. Калинин, В. Ф. Планирование работы коллектива роботов-лаборантов / В. Ф. Калинин, В. А. Погонин // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 9. – С. 20–24. doi: 10.17513/snt.39758
5. Кафаров, В. В. Проблемы управления детерминированно-стохастическими моделями / В. В. Кафаров, В. И. Бодров, В. Г. Матвейкин // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308, № 3. – С. 663–666.
6. Разработка автоматизированного контроля пересечения траекторий движения роботов-манипуляторов / В. В. Булатов, Н. Г. Джаошвили, О. С. Нуяя,

Р. В. Рудаков, М. В. Сержантова, Н. В. Савельев // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 2. – С. 24–29. doi: 10.17513/snt.40299

7. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой / В. А. Глазунов, А. Ш. Колисков, А. Ф. Крайнев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 1. – С. 41–49.

Classification of Robotic Team Control Problems in Chemical Industry

© V. F. Kalinin¹✉, V. A. Pogonin²

¹Department of Electric Power Engineering, kalinin@tstu.ru;

²Department of Information Processes and Management,
TSTU, Tambov, Russian Federation

Keywords: probability; task classification; multi-agent robot control.

Abstract: The paper systematizes the tasks of controlling a team of laboratory robots. The tasks of determining the trajectories of the robot's gripper are systematized based on various criteria: the need for the gripper to follow a predetermined trajectory or to specify only the end point of its movement rather than the entire route; Determining a trajectory over time, assuming a fixed point at a specific moment, or a parametric task, assuming a gripper sequentially passes through a specific set of points, but without fixing the time of this passage; determining a trajectory when not only the gripper's location at a given point in space but also its orientation in space is required; problems of finding a trajectory in a predetermined form or taking into account the probability of random fluctuations in the gripper's motion caused by random interference. A number of modifications to well-known optimal control methods are considered, allowing, in some cases, to find optimal trajectories more efficiently (with less time loss, more accurately using a “technological” class of possible trajectories).

References

1. Kalinin V.F., Pogonin V.A. [Control of a Multi-Agent System of Robotic Laboratory Assistants], *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2024. no. 5-1, pp. 43-49. doi: 10.17513/snt.40003 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Beloglazov D.A., Gayduk A.R., Kosenko Ye.Yu. *Gruppovoye upravleniye podvizhnymi ob'yektami v neopredelennykh sredakh* [Group Control of Moving Objects in Uncertain Environments], Moscow: Fizmatlit, 2015, 305 p. (In Russ.)
3. Vorob'yeva N.S. [Control Methods for Tripod-Based Manipulators During Technological Operations], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2022, no. 3, pp. 3-12. doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-314 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Kalinin V.F., Pogonin V.A. [Planning the Work of a Team of Robotic Laboratory Assistants], *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2023, no. 9, pp. 20-24. doi: 10.17513/snt.39758 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Kafarov V.V., Bodrov V.I., Matveykin V.G. [Problems of Control of Deterministic-Stochastic Models], *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1989, vol. 308, no. 3, pp. 663-666. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Bulatov V.V., Dzhaoshvili N.G., Nuyya O.S., Rudakov R.V., Serzhantova M.V., Savel'yev N.V. [Development of automated control of the intersection of the motion trajectories of robotic manipulators], *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern

Science-Intensive Technologies], 2025, no. 2, pp. 24-29. doi: 10.17513/snt.40299 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. [et al.], [Classification principles and methods of analysis of spatial mechanisms with a parallel structure], *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 1990, no. 1, pp. 41-49. (In Russ., abstract in Eng.)

Klassifizierung der Probleme bei der Steuerung eines Roboterteams in der chemischen Produktion

Zusammenfassung: Es sind die Steuerungsprobleme eines Laborroboter-Teams systematisiert. Die Probleme der Bestimmung der Trajektorien des Robotergreifers sind anhand verschiedener Kriterien systematisiert: die Notwendigkeit, dass der Greifer einer vorgegebenen Trajektorie folgt oder nur den Endpunkt seiner Bewegung anstelle der gesamten Route vorgibt; die zeitliche Bestimmung der Trajektorien unter Annahme eines festen Standorts zu einem bestimmten Zeitpunkt oder eine parametrische Aufgabe, bei der der Greifer nacheinander eine bestimmte Menge von Punkten passiert, ohne den Zeitpunkt dieses Durchgangs festzulegen; die Bestimmung der Trajektorien, wenn neben dem Standort des Greifers an einem gegebenen Punkt im Raum auch seine Orientierung im Raum erforderlich ist; Probleme der Bestimmung der Trajektorien in vorgegebener Form oder unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit zufälliger Schwankungen in der Greiferbewegung aufgrund zufälliger Störungen. Es sind verschiedene Modifikationen bekannter optimaler Steuerungsmethoden betrachtet, die es in einigen Fällen ermöglichen, optimale Trajektorien effizienter zu finden (mit geringerem Zeitverlust, genauer durch Verwendung einer „technologischen“ Klasse möglicher Trajektorien).

Classification des tâches de la gestion de l'équipe de robots dans la production chimique

Résumé: Est réalisée une systématisation des tâches de la gestion d'une équipe de robots de laboratoire. Sont systématisées les tâches de la détermination des trajectoires du déplacement du dispositif de la préhension du robot à la base de différents critères: la nécessité de suivre le dispositif de préhension le long d'une trajectoire prédéterminée ou l'indication de l'itinéraire mais seulement du point final de son déplacement; déterminer la trajectoire dans le temps, en supposant qu'il se trouve à un point fixe à un moment donné, ou une tâche paramétrique, en supposant que le dispositif de capture passe successivement un certain ensemble de points, mais sans fixer le moment de ce passage; déterminer la trajectoire, quand il est nécessaire non seulement de trouver le dispositif de capture à un point donné de l'espace, mais aussi son orientation dans l'espace; les tâches de trouver la trajectoire sous une forme prédéterminée ou en tenant compte de la probabilité de fluctuations aléatoires dans le mouvement du dispositif de capture dues à l'influence d'interférences aléatoires. Sont envisagées nombre de modifications des méthodes connues de contrôle optimal, permettant dans certains cas de trouver des trajectoires optimales plus efficacement (avec des pertes de temps plus faibles, plus précisément en utilisant la classe «technologique» des trajectoires possibles).

Авторы: *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика»; *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.