

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО ПЛАВАЮЩЕГО РОБОТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

Л.А. Краснодубец

Институт природно-технических систем
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: lakrasno@gmail.com

Предложен способ очистки водной поверхности технологического бассейна при помощи автономного плавающего робота-мусоросборщика, оснащенного программным устройством и адаптивной системой траекторного управления. Разработана конструкция и концепция применения плавающего робота, а также его математическая модель и адаптивный регулятор, обеспечивающий траекторное управление при выполнении сценария очистки бассейна, который задается программным устройством.

Ключевые слова: плавающий робот, процесс очистки, математическая модель, обратная задача динамики, траекторное управление, закон управления, адаптивный регулятор, оптимизация.

Введение. Технологические процессы выгрузки или загрузки реактора ядерной электростанции предусматривают операцию транспортировки топливных элементов через специальный водный бассейн с целью снижения радиационного фона в окружающей среде. В результате бассейн загрязняется радиоактивным мусором, плавающим на водной поверхности, который регулярно убирается персоналом вручную при помощи специального сачка. Для сокращения времени пребывания работников электростанции в опасной зоне и повышения качества уборки предлагается автономный плавающий робот-мусоросборщик.

Известны роботы-чистильщики, предназначенные для автоматической очистки от обрастания водорослями вертикальных стенок и дна бассейнов. Существуют несколько разновидностей таких подводных аппаратов. При этом нет никаких сведений о роботах, собирающих плавающий радиоактивный мусор.

Целью настоящей статьи является разработка концепции создания и применения, а также моделирование и исследование динамических свойств автономного плавающего робота-мусоросборщика с адаптивным управлением.

Конструкция корпусной части и концепция применения. В качестве прототипа конструкции предлагаемого робота принята компоновка судна катамаранного типа, оборудованного в носо-

вой части направляющими плоскостями, обеспечивающими захват плавающего на поверхности воды мусора и направление его с током воды в накопитель, образованный корпусами катамарана и закрытой сеткой кормовой частью. Суда подобной компоновки используются в портах для очистки водной поверхности бухт от плавающих предметов.

Конструкция корпусной части предлагаемого робота выглядит, как показано на рис. 1, в виде малоразмерного судна катамарана, которое, в отличие от прототипа, приводится в движение двумя воздушными движителями – канализированными вентиляторами (левым и правым), расположенными симметрично относительно продольной оси. Этим обеспечивается не только поступательное, но и вращательное движение. В предлагаемой конструкции установка аэроулей, которые при малых скоростях движения плавающего робота малоэффективны, не предусмотрена. Поворотный момент создается за счет разности тяг двух вентиляторных движителей, применение которых устраняет контакт подвижных элементов корпусной части прототипа (рулей и винтов) с радиоактивной водой и повышает маневренность плавающего робота.

Концепция применения робота-мусоросборщика предусматривает наличие программного устройства, содержащего сценарии процессов очистки бассейна, представляющих собой набор траекторий, заданных в виде уравнений в пара-



Рис. 1. Схема компоновки двигателей на судне катамаране

метрической форме вместе с необходимыми данными, а также системы траекторного управления, обеспечивающей реализацию выбранных сценариев как требуемых процессов очистки.

Таким образом, процесс автоматической очистки бассейна начинается с выбора сценария и задания начальных условий (начального местоположения робота на водной поверхности), а также его конечного положения по завершению сценария очистки. Возможно применение дистанционного управления (как дополнительная опция) для установки робота в начальное положение или при досрочном завершении сценария очистки для перевода его в конечное положение, где должен эвакуироваться сменный накопитель, заполненный мусором. Установка нового (пустого) накопителя может проводиться в другом месте, предусмотренном конкретным технологическим процессом очистки.

Математическая модель движения робота-мусоросборщика. Пусть x и y – декартовы координаты центра масс робота в системе OXY , а угол θ характеризует положение продольной оси. В таком случае уравнения движения объекта управления с тремя степенями свободы записываются в виде

$$M \frac{d^2 q}{dt^2} = -D \frac{dq}{dt} + f, \quad (1)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -d_\omega \frac{d\theta}{dt} = \mu \quad (2)$$

с начальными условиями

$$t = 0: q(0) = q_0, \quad \frac{dq(0)}{dt} = \dot{q}_0,$$

$$\theta(0) = \theta_0, \quad \frac{d\theta(0)}{dt} = \dot{\theta}_0,$$

$$\text{где } M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_v & 0 \\ 0 & d_v \end{bmatrix},$$

$$f = [f_x \ f_y]^T, \quad q = [x \ y]^T,$$

m и J – масса и момент инерции робота; x и y – координаты местоположения; d_v и d_ω – коэффициенты вязкого трения соответственно при поступательном и вращательном движении; θ – угол между продольной осью робота и осью OX ;

$$f_x = (F_L + F_R) \cos \theta, \quad f_y = (F_L + F_R) \sin \theta$$

– управляющие функции (силы), обеспечивающие поступательное движение плавающего робота; $\mu = l(F_R - F_L)$ – управляющая функция (момент), обеспечивающий вращательное движение плавающего робота; F_L и F_R – силы тяги соответственно левого и правого двигателей; l – плечо момента сил F_L и F_R .

Конструирование закона адаптивного управления. Выбор закона адаптивного управления плавающим роботом-мусоросборщиком предопределен отсутствием числовых данных об элементах матрицы D и моменте инерции J . Решение задачи конструирования закона адаптивного управления выполним в два этапа в соответствии с подходом, предложенным в [1]. На первом этапе задачу следования назначенной траектории сформулируем следующим образом. Пусть движение центра масс робота под действием вектора управляющей силы f описывается дифференциальным уравнением (1) с соответствующими начальными условиями, которое приведем к виду

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = -A \frac{dq}{dt} + Bf, \quad (3)$$

где $A = M^{-1}D$; $B = M^{-1}$;
 $f = [f_x, f_y]^T$, а траектория назначенного движения задана в виде векторного уравнения

$$r(t) = [\varphi_x(t) \varphi_y(t)]^T, \quad (4)$$

где $\varphi_x(t)$ и $\varphi_y(t)$ – гладкие функции, имеющие производные.

Требуется найти управляющую вектор-функцию $f(t, q, \frac{dq}{dt})$ в форме обратной связи, обеспечивающую перемещение центра масс робота вдоль назначенной траектории (4). Потребуем также при этом, чтобы возможные отклонения положения центра масс от назначенной траектории

$$\Delta(t) = r(t) - q(t) \quad (5)$$

были исчезающими функциями, которые определяются в процессе управляемого движения некоторым эталонным процессом с описанием в виде однородного дифференциального уравнения

$$\frac{d^2\Delta}{dt^2} + H_1 \frac{d\Delta}{dt} + H_0\Delta = 0; \quad (6)$$

с начальными условиями

$$t = 0: \Delta(0) = \Delta_0, \frac{d\Delta(0)}{dt} = \Delta_1,$$

где коэффициенты матриц H_0 и H_1 следует выбирать такими, чтобы характер и длительность процессов $\Delta(t) \rightarrow 0$ в идентичных по предположению каналах

управления, полученной из (3) системы

$$\frac{d^2q}{dt^2} = -A \frac{dq}{dt} + Bf(t, q, \frac{dq}{dt}),$$

были приемлемыми. При этом в качестве меры динамического отклонения текущей траектории центра масс робота от назначенной траектории примем критериальные функции, характеризующие нормированную по массе энергию ускорения, в виде

$$G(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{d^2q^*}{dt^2} - \frac{d^2q(f)}{dt^2} \right]^2, \quad (7)$$

где $\frac{d^2q^*}{dt^2}$ – вектор требуемых ускорений, обеспечивающих движение центра

масс вдоль назначенной траектории; $\frac{d^2q(f)}{dt^2}$ – вектор ускорений центра масс робота, вызываемых приложенной к нему управляющей вектор-функцией.

Таким образом, решение поставленной задачи – нахождение управляющей вектор-функции следует выполнять исходя из требования, чтобы на траекториях управляемого движения значения критериальной функции (7) в каждый момент времени принадлежали малой окрестности ее минимума.

Решение этой обратной задачи динамики [2] выполним путем минимизации (7), где искомого управление находится из решения дифференциального уравнения [3]

$$\frac{df(t)}{dt} = -L \frac{\partial G(f)}{\partial f}, \quad (8)$$

L – диагональная матрица параметров $\lambda_x = \lambda_y = const > 0$, характеризующих скорость приближения вектор-функции $f(t)$ к ее оптимальному значению f_{opt} .

Преобразуем уравнение (8), вычислив производную для критериальной функции (7) с учетом (3). Имеем

$$\frac{df(t)}{dt} = L \left[\frac{d^2q^*}{dt^2} - \frac{d^2q(f)}{dt^2} \right] B. \quad (9)$$

Далее из уравнения (6) с учетом (5) найдем вектор ускорения $\frac{d^2q^*}{dt^2}$, который теоретически точно соответствует следованию центра масс объекта управления – робота заданной траектории (4), и подставим его в (9). Учитывая (5), имеем

$$\frac{df(t)}{dt} = L \left[\frac{d^2\Delta}{dt^2} + H_1 \frac{d\Delta}{dt} + H_0\Delta \right] B. \quad (10)$$

Выполняя интегрирование (10) при нулевых начальных условиях, можно найти закон управления, определяющий искомую вектор-функцию $f(t)$ в виде

$$f(t) = [H_1 \Delta + H_0 \int_0^t \Delta d\tau + \frac{d\Delta}{dt}] K, \quad (11)$$

где $K = LB$.

Как следует из (11), для формирования управляющей вектор-функции $f(t)$ необходима информация о выходах $q(t)$ и $\frac{dq}{dt}$, которая может поставляться при помощи отрицательной обратной связи от навигационной системы, а также информация о требуемой траектории движения $r(t)$ и $\frac{dr}{dt}$, которая может быть сформирована в специальном устройстве — генераторе траектории. Примечательно, что закону управления (11) соответствует структурная схема, которая имеет вид структуры традиционного ПИД-регулятора с двумя автономными каналами. При этом матрицы коэффициентов H_1 и H_0 (для пропорциональных и интегральных ветвей соответственно) находятся при помощи уравнения (6) при отличных от нуля начальных условиях и требуемых критериев качества переходных процессов. Для дифференциальных ветвей коэффициенты передачи принимаются единичными.

Найденную управляющую вектор-функцию (11), имеющую физический смысл механической силы, нельзя непосредственно использовать для управления плавающим роботом, имеющим три степени свободы.

Преобразование двумерного вектора управляющих функций f в управляющие воздействия. Решение этой задачи выполняется на втором этапе конструирования закона траекторного управления плавающим роботом, оснащенным двумя вентиляторными двигателями. В рассматриваемом случае управляющие воздействия могут быть представлены суммарной силой тяги $F_s(t)$ и моментом вращения $\mu(t)$, который изменяет угол $\theta(t)$, характеризующий угловое положение плавающего робота на водной поверхности технологического бассейна (координатной плоскости OXY).

Таким образом, для эффективного управления движением робота-мусо-

росборщика вдоль требуемой траектории необходимо выполнить преобразование управляющих функций $f_x(t)$ и $f_y(t)$ в управляющие воздействия $F_s(t)$ и $\mu(t)$, создаваемые парой воздушных двигателей, развивающих силы тяги F_L и F_R (левого и правого) соответственно. Управляющее воздействие F_s — суммарную силу тяги, которая направлена вдоль продольной оси, можно определить соотношением

$$F_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}.$$

Для нахождения управляющего воздействия $\mu(t)$ — момента вращения по известным управляющим функциям f_x и f_y следует принять во внимание, что функция $\theta(t)$ входит в уравнение (2) и связана с управляющими силами соотношением

$$\theta(t) = \arctg \frac{f_y(t)}{f_x(t)}. \quad (12)$$

В таком случае закон управления угловым движением плавающего робота при следовании вдоль требуемой траектории (4) можно найти на основании уравнения (2) по аналогии решения задачи конструирования закона управления (11), но для другой формулировки цели управления и при использовании эталонной модели в виде

$$\frac{d^2\theta^*}{dt^2} + \beta_1 \frac{d\theta^*}{dt} + \beta_0 \theta^* = \beta_0 \bar{\theta},$$

с начальными условиями

$$t = 0: \theta^*(0) = \theta_0, \quad \frac{d\theta(0)}{dt} = \dot{\theta}_0$$

и записать его в виде скалярного уравнения для управляющего момента

$$\mu(t) = \lambda_\mu \frac{1}{J} \left[\int_0^t \beta_0 (\bar{\theta} - \theta) d\tau - \beta_1 \theta - \frac{d\theta}{dt} \right], \quad (13)$$

где β_0 и β_1 — параметры эталонной модели, определяющие желаемую динамику углового движения робота; J — момент инерции; λ_μ — постоянная; $\bar{\theta}$ — требуемый угол ориентации робота, который

вычисляется по формуле (12); θ и $\frac{d\theta}{dt}$ – сигналы обратной связи от гироскопической бортовой навигационной системы.

Найденные управляющие воздействия F_s и $\mu(t)$ позволяют вычислить силы тяги двух установленных параллельно продольной оси вентиляторных двигателей, обеспечивающих следование автономного робота-мусоросборщика назначенной программой уборки траектории, по формулам

$$\left. \begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2} \left(F_s - \frac{\mu(t)}{l} + F_0 \right) \\ F_R &= \frac{1}{2} \left(F_s + \frac{\mu(t)}{l} + F_0 \right) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где F_s – суммарная сила тяги двух вентиляторных двигателей; F_0 – постоянная составляющая суммарной силы тяги двух вентиляторных двигателей; l – плечо момента сил тяги.

Заключение. Моделирование с учетом ограничений сил тяги вентиляторных двигателей показало, что полученный закон управления в виде векторного уравнения (11) обеспечивает требуемое движение робота по спирали границы к центру окружности, ограничивающей бассейн. При этом в программном устройстве формируется траектория (спираль) движения автономного плавающего робота-мусоросборщика при помощи параметрических уравнений, опре-

деляющих режим уборки технологического бассейна. Адаптивные свойства системы управления обеспечивают следование роботом заданной траектории при изменении параметрических и координатных возмущений. Процесс уборки можно ограничить заданным временем, если применить закон терминального управления [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснодубец Л.А., Осадченко А.Е. Аналитическое проектирование законов траекторного управления мобильными роботами // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 3783–3791.
2. Крутько П.Д. Новые технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением // Управление, автоматизация и окружающая среда: материалы междунард. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2008. С. 4–24.
3. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 244 с.
4. Краснодубец Л.А., Дмитришин А.А. Терминальное управление колесным роботом «Robotino» // Вестник СевНТУ: сб. науч. тр. Севастополь, 2015. Вып. 147. С. 84–89.

APPLICATION OF FLOATING AUTONOMOUS ROBOT FOR CLEANING THE SURFACE WATER TECHNOLOGY POOL

L.A. Krasnodubets

Institute of natural and technical systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: lakrasno@gmail.com

A method of cleaning the pool water surface process using autonomous floating robot equipped with a programming device and adaptive system trajectory control is offered. A design and application of the concept of a floating robot, as well as its mathematical model and an adaptive controller that provides trajectory control in the performance of the pool clean scenario, which is set by the software device.

Keywords: floating robot, the cleaning process, a mathematical model, inverse problem of dynamics, trajectory control, the control law, adaptive control, optimization.