

УДК 517.977+531.011

DOI 10.35211/1990-5297-2024-9-292-43-46

К. Ю. Лепетухин, Л. Д. Смирная, М. В. Семибратова

**ОБ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ПО НЕКРУГЛЫМ ПОЛЯМ
МНОГОСЕКЦИОННЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ***

Волгоградский государственный технический университет

lepkon@gmail.com, dtm@vstu.ru, mariatiminen@yandex.ru

Предложен новый подход к оптимальному управлению многосекционной дождевальной машиной кругового действия при обработке полей некруглой формы. Составлена система дифференциальных уравнений для нахождения оптимального пути подвижных опор дождевальных машин кругового действия.

Ключевые слова: оптимальное управление, голономные связи, многосекционные роботы, групповое управление, дождевальные машины кругового действия.

© Лепетухин К. Ю., Смирная Л. Д., Семибратова М. В., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

K. Yu. Lepetukhin, L. D. Smirnaya, M. V. Semibratova

ON OPTIMIZING THE DRIVING MODE ON NON-CIRCULAR FIELDS OF MULTI-SECTION CENTER-PIVOT IRRIGATION MACHINES

Volgograd State Technical University

A new approach for optimal control of multi-section center-pivot irrigation machines for processing non-circular fields is presented. A system of differential equations has been developed to find the optimal path for moving towers of center-pivot irrigation machines.

Keywords: optimal control, holonomic constraints, multi-section robots, group control, center-pivot irrigation machines.

Введение

С точки зрения управления многосекционные дождевальные машины кругового действия представляют собой группу мобильных роботов, связанных между собой жесткими секциями и совершающих совместное плоское движение вокруг неподвижной опоры. Такой подход позволяет рассматривать их как сочлененные роботы с наложенными на них голономными связями [1, 2].

Нахождение оптимальных законов управления может вестись в соответствии с разными критериями [3]. Ранее [4–6] рассмотрены вопросы нахождения оптимальной конфигурации дождевальной машины кругового действия при изменении текущего радиуса обработки поля, способов изменения углов между смежными

секциями дождевальной машины, управления линейной скоростью подвижных опор для достижения требуемой конфигурации.

Актуальной остается задача нахождения оптимальной траектории движения подвижных опор дождевальной машины для минимизации суммы длин следовых дорожек.

Постановка задачи

Рассматривается обработка некруглого поля при совершении полного оборота вокруг неподвижной опоры. При завершении каждого цикла все подвижные опоры возвращаются в исходное положение, и траектория их движений становится замкнутой.

На рис. 1 показан возможный пример обхода поля при выполнении работ.

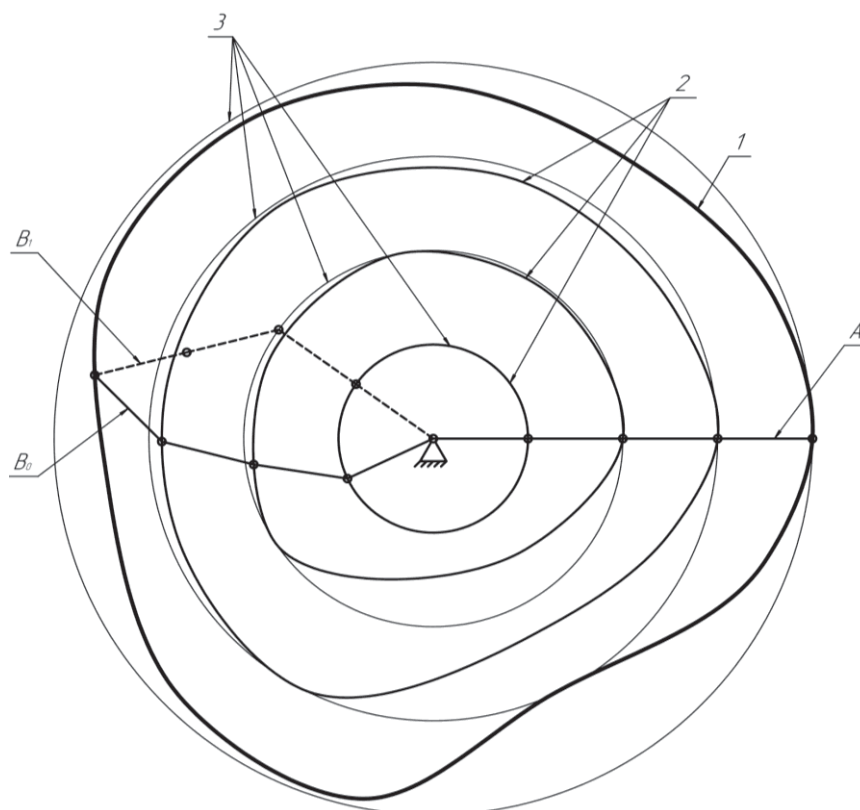


Рис. 1. Пример траекторий движения подвижных опор:

1 – кромка поля; 2 – следовые дорожки от движения подвижных опор; 3 – следовые дорожки дождевальной машины кругового действия без изменения конфигурации; A – единственная возможная конфигурация; B₀, B₁ – альтернативные возможные конфигурации

В зависимости от соотношения общей длины дождевальной машины и текущего обрабатываемого радиуса поля конфигурация дождевальной машины может быть единственной A или иметь какие-то альтернативы. Например, на рис. 1 конфигурация B_0 находится на траектории, соответствующей минимальной длине следовых дорожек, и является оптимальной, а конфигурация B_1 – нет.

Таким образом, ставится задача нахождения оптимальной траектории движения подвижных

опор дождевальной машины для минимизации пройденного ими пути.

Составление системы уравнений

Поиск решения осуществляется при следующих допущениях:

1. Уравнения кромки поля известны, и периферийная подвижная опора движется по ней.
2. Известна начальная конфигурация дождевальной машины. Рассмотрен случай с участком поля с радиусом, равным суммарной длине всех секций дождевальной машины.

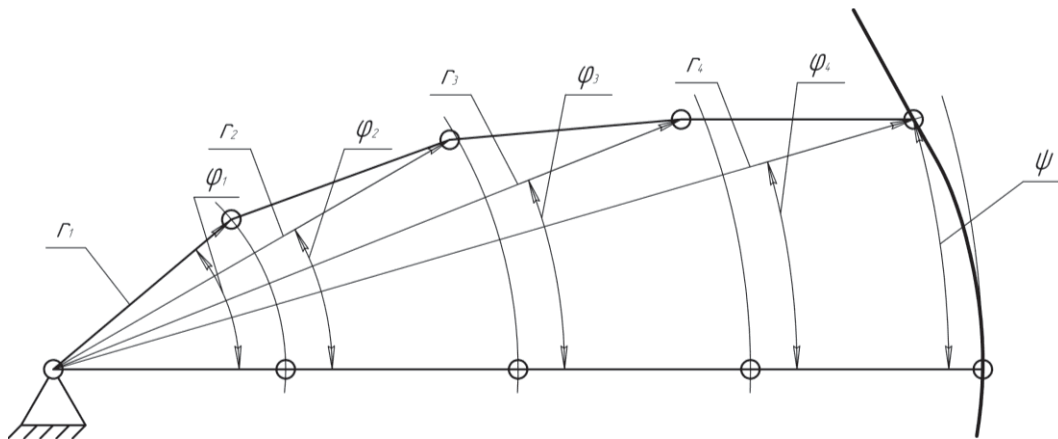


Рис. 2. Расчетная схема

На рис. 2 представлена расчетная схема, где все обобщенные координаты r_i – радиус-векторы между неподвижной опорой и i -й подвижной опорой; φ_i – угол между направлением, выбранным за нулевое, и радиус-вектором, соединяющим неподвижную опору с i -й подвижной опорой; зависят от угла ψ между направлением, выбранным за нулевое, и радиус-вектором, соединяющим неподвижную опору с периферийной подвижной опорой. Система уравнений в общем виде для n подвижных опор выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} r_1 = r_1(\psi) \\ \varphi_1 = \varphi_1(\psi) \\ \vdots \\ r_n = r_n(\psi) \\ \varphi_n = \varphi_n(\psi) \end{cases} \quad (1)$$

Из всех $2n$ уравнений (1) нам известны выражения для r_1 , r_n и φ_n .

Приращение пути k -й подвижной опоры определяется как (2)

$$dS_k = r_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial \psi} d\psi. \quad (2)$$

Подвижные опоры дождевальной машины соединены между собой недеформируемыми секциями длины l , что обуславливает необходимость дополнительно использовать уравнения связи (3).

$$\forall j \in [2; n],$$

$$r_j^2 + r_{j-1}^2 - 2r_j r_{j-1} \cos(\varphi_j - \varphi_{j-1}) - l^2 = 0. \quad (3)$$

Исходя из (2) и (3), выражение для критерия оптимальности I , соответствующего минимальной длине следовых дорожек, будет иметь следующий вид (4):

$$I = \int_0^{2\pi} \left(\sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \psi} + \sum_{j=2}^n \lambda_j (r_j^2 + r_{j-1}^2 - 2r_j r_{j-1} \cos(\varphi_j - \varphi_{j-1}) - l^2) \right) d\psi \rightarrow \min. \quad (4)$$

Обозначим подынтегральную функцию в (4) через F .

Исследуя функционал (4) с граничными

условиями (5) методами вариационного исчисления, находим систему уравнений траекторий для всех подвижных опор (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1(0) = r_1(2\pi) = l \\ \varphi_1(0) = \varphi_1(2\pi) = 0 \\ r_2(0) = r_2(2\pi) = 2l \\ \varphi_2(0) = \varphi_2(2\pi) = 0 \\ \vdots \\ r_n(0) = r_n(2\pi) = nl \\ \varphi_n(0) = \varphi_n(2\pi) = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial \varphi_i} - \frac{d}{d\psi} \frac{\partial F}{\partial \varphi'_i} = 0, \quad i \in [2; n-1] \\ \frac{\partial F}{\partial r_k} - \frac{d}{d\psi} \frac{\partial F}{\partial r'_k} = 0, \quad k \in [1; n-1] \\ r_j^2 + r_{j-1}^2 - 2r_j r_{j-1} \cos(\varphi_j - \varphi_{j-1}) - l^2 = 0, \quad j \in [2; n] \end{array} \right. \quad (6)$$

Заключение

Используя методы вариационного исчисления, составлена система дифференциальных уравнений для нахождения зависимости положения каждой из подвижных опор многосекционной дождевальной машины кругового действия от текущего положения периферийной подвижной опоры на кромке поля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев, А. В. Принципы построения и классификации шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов / А. В. Васильев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 1. – С. 124–131.
2. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич. – СПб., 2005. – 416 с.
3. Лепетухин, К. Ю. О критериях оптимизации движения секций дождевальной машины кругового действия при обработке полей сложной формы / К. Ю. Лепетухин, А. В. Малолетов, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : № 8 (218) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – С. 117–121.
4. Лепетухин, К. Ю. Об оптимальном управлении взаимным расположением секций дождевальной машины кругового действия при обработке некруглых полей / К. Ю. Лепетухин, А. В. Малолетов, Е. С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 103–107.
5. On the movement of center-pivot irrigation machine for processing non-circular fields / K. Y. Lepetukhin, M. V. Miroshkina, V. N. Platonov [et al.] // 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics, DCNAIR 2019 : 3, Innopolis, 09–11 сентября 2019 года. – Innopolis, 2019. – Pp. 112–115.
6. On Controlling the Shape of a Circular Sprinkling Machine and the Stability of Its Programmed Motion / E. S. Briskin, Y. V. Kalinin, K. Y. Lepetukhin [et al.] // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2021. – Vol. 60, No. 5. – Pp. 817–826.