

УДК 625.144.6

ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА МАНИПУЛЯТОРНЫМИ МАШИНАМИ

Платонов А.А.

Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Россия)

В настоящее время ОАО «РЖД» формирует согласованную политику в области обеспечения безопасности и надёжности перевозочного процесса. При этом одной из актуальных является проблема удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности в полосе отвода железных дорог. Для повышения производительности труда и качества очистки полосы отвода применяются рабочие органы, агрегируемые с транспортными средствами, снабжёнными манипуляторными установками. В статье рассматриваются вопросы моделирования сферического рабочего пространства манипуляторных машин в полосе отвода железных дорог с учётом разделения фактического объёма данного пространства на ряд зон. Приведены схемы формирования и ограничения рабочего пространства малозвенного манипулятора с роторным рабочим органом. Сделан вывод о перспективах получения с учётом приведённых элементов математической модели ряда важнейших практических рекомендаций для системы машин, обладающих определёнными общими свойствами.

Ключевые слова: железная дорога, полоса отвода, нежелательная растительность, моделирование.

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-48-55

В настоящее время для железных дорог России и мира продолжает оставаться актуальной проблема борьбы с нежелательной древесно-кустарниковой растительностью в полосе отвода железных дорог [1].

Среди существующих методов управления ростом нежелательной древесно-кустарниковой растительности, применение которых на полосе отвода по отдельности или в совокупности зависит от целого ряда факторов, старейшим и традиционным является механический метод [2]. При таком методе удаление надземной части нежелательной древесно-кустарниковой растительности производится её вырезанием рабочими органами, расположенными, например, на конце стрелы-манипулятора транспортного средства [3, 4].

При установке манипулятора с рабочим оборудованием на транспортном средстве и приведении его в действие для удаления с его помощью с полосы отвода железных дорог нежелательной древесно-кустарниковой растительности будет формироваться некоторая зона действия манипулятора, определяемая его кинематической схемой [5, 6].

В общем случае рабочее пространство манипулятора с закреплённым на его конце рабочим органом можно представить в виде сферы, центр которой совпадает с центром вращения поворотной платформы манипулятора (рис. 1).

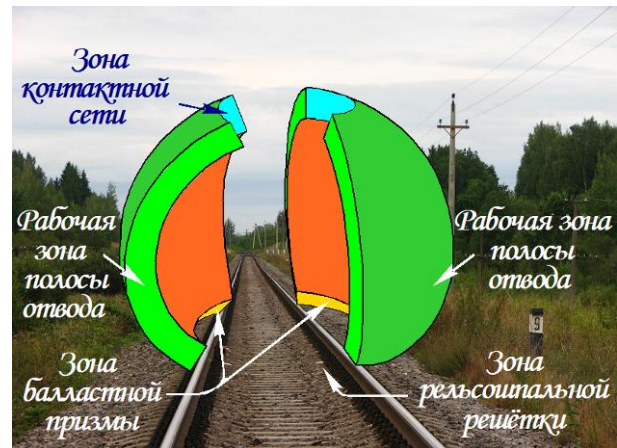


Рис. 1. Сферическое рабочее пространство манипуляторных машин в полосе отвода железных дорог

При моделировании фактического объёма сферического рабочего пространства манипуляторных машин в полосе отвода железных дорог отдельное внимание следует уделить части данного объёма, находящегося в так называемой «зоне контактной сети» $V_{\text{конт}}$. Данная зона определяется углом сектора, расположенного над рельсошпальной решёткой в зоне контактной сети электрифицированных железных дорог [7], и ввиду фактического отсутствия в ней нежелательной растительности, а также конструктивных ограничений по углу подъёма стрелы манипулятора, объём рассматриваемой зоны не

включается в фактический объём сферического рабочего пространства.

Часть объёма сферического рабочего пространства $V_{\text{конт}}$, находящегося в зоне контактной сети, определим как объём шарового сектора (рис. 2, а) с учётом максимального угла подъёма манипулятора $\varphi_{\text{max мн}}$ и приращения данного угла $\Delta\varphi_{\text{max мн}}$.

Суммарный предельный угол $\varphi_{\text{max мн}} + \Delta\varphi_{\text{max мн}}$, определяющий крайнее положение характерной точки рабочего оборудования (рис. 3), связан с углом ограничения подъёма манипулятора φ'_∂ следующим образом:

$$\sin(\varphi_{\text{max мн}} + \Delta\varphi_{\text{max мн}}) = \cos \frac{\varphi'_\partial}{2}.$$

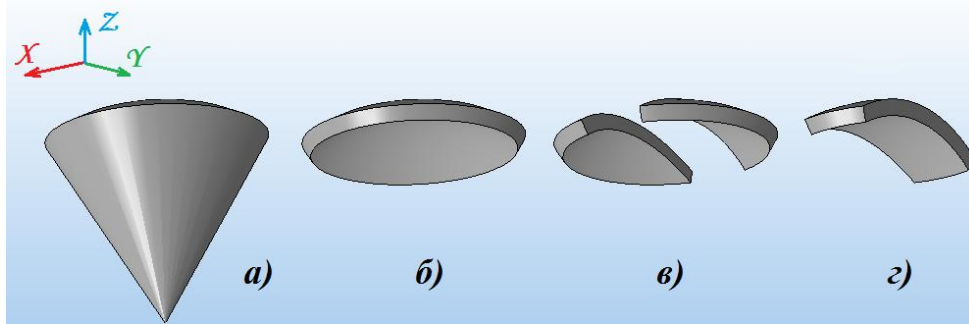


Рис. 2. Моделирование объёма сферического рабочего пространства, находящегося в зоне контактной сети

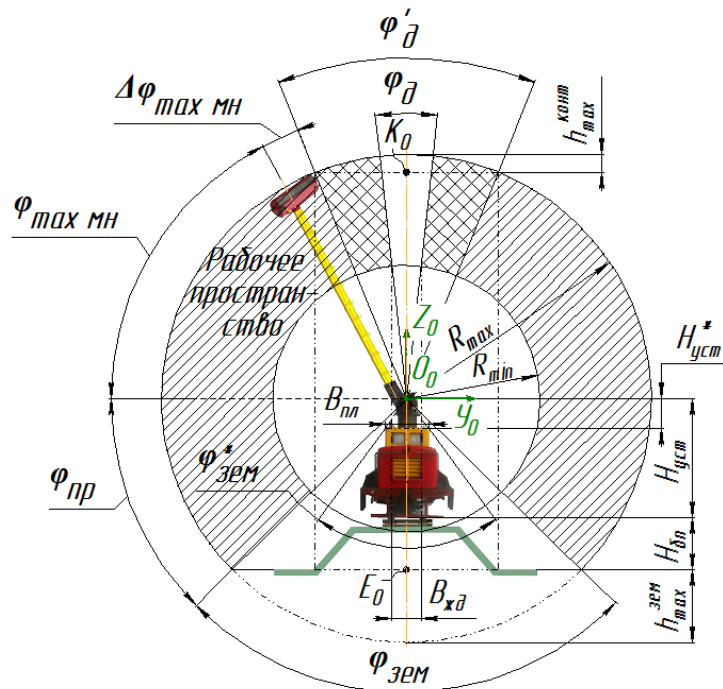


Рис. 3. Схема ограничений сферического рабочего пространства манипуляторных машин в полосе отвода железных дорог

Максимальный объём сектора контактной сети определится как

$$V_{\text{max}}^{\text{конт}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_{\text{max}}^2 \cdot h_{\text{max}}^{\text{конт}}.$$

Для определения высоты сегмента максимального сектора контактной сети $h_{\text{max}}^{\text{конт}}$ выразим угол φ'_∂ как

$$\cos \frac{\varphi'_\partial}{2} = \frac{O_0 K_0}{R_{\text{max}}}.$$

Откуда $O_0K_0 = R_{\max} \cdot \cos \frac{\varphi'_d}{2}$. Тогда

$$h_{\max}^{\text{конт}} = R_{\max} - O_0K_0 = \\ = R_{\max} - R_{\max} \cdot \cos \frac{\varphi'_d}{2} = R_{\max} \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi'_d}{2}\right).$$

С учётом вышеизложенного, максимальный объём сектора контактной сети:

$$V_{\max}^{\text{конт}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_{\max}^2 \cdot h_{\max}^{\text{конт}} = \\ = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_{\max}^2 \cdot R_{\max} \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi'_d}{2}\right).$$

Для определения параметра $\cos \frac{\varphi'_d}{2}$ как функции изменения угла $\Delta \varphi_{\max \text{ мн}}$ примем во внимание, что в общем случае динамическая ширина захвата роторного рабочего органа $B_{\text{раб}}^*$, определяющая положение характерной точки в плоскости $Y_2O_2Z_2$ (рис. 4), будет равна:

$$B_{\text{раб}}^* = \frac{B_{\text{раб}}}{2} \cdot \cos \Theta_3.$$

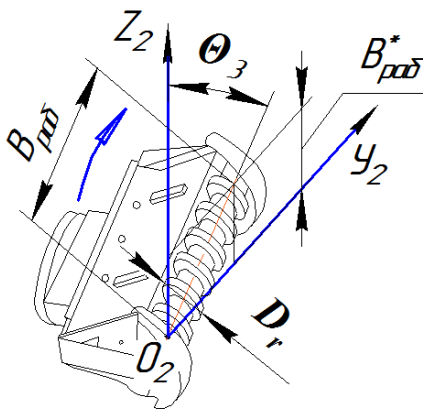


Рис. 4. Схема динамического изменения ширины захвата роторного рабочего органа

При угле поворота рабочего оборудования вокруг его оси $\Theta_3 = 0^0$ динамическая ширина захвата роторного рабочего органа $B_{\text{раб}}^* = B_{\text{раб}} / 2$. С учётом того, что

$$\sin \Delta \varphi_{\max \text{ мн}} = \frac{B_{\text{раб}}^*}{R_{\max}}$$

и

$$V_{\text{конт}}' = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(1 - \frac{\varphi_{\max \text{ мн}} + \Delta \varphi_{\max \text{ мн}}}{90}\right) \cdot \sin \frac{\varphi_d}{2} \cdot (R_{\max}^3 - R_{\min}^3) =$$

$$\frac{\varphi'_d}{2} = 90 - \varphi_{\max \text{ мн}} - \Delta \varphi_{\max \text{ мн}},$$

получаем

$$\frac{\varphi'_d}{2} = 90 - \varphi_{\max \text{ мн}} - \arcsin \frac{B_{\text{раб}}}{2 \cdot R_{\max}},$$

где $\varphi_{\max \text{ мн}}$ – максимальный угол подъёма манипулятора, указываемый в технической характеристике манипулятора; R_{\max} – максимальный радиус работы характерной точки рабочего органа.

Тогда

$$V_{\max}^{\text{конт}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_{\max}^3 \times \\ \times \left(1 - \cos \left(90 - \varphi_{\max \text{ мн}} - \arcsin \frac{B_{\text{раб}}}{2 \cdot R_{\max}}\right)\right).$$

Аналогично, высота сегмента минимального сектора контактной сети:

$$h_{\min}^{\text{конт}} = R_{\min} - R_{\min} \cdot \cos \frac{\varphi'_d}{2} = R_{\min} \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi'_d}{2}\right).$$

Тогда минимальный объём сектора контактной сети:

$$V_{\min}^{\text{конт}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_{\min}^3 \times \\ \times \left(1 - \cos \left(90 - \varphi_{\max \text{ мн}} - \arcsin \frac{B_{\text{раб}}}{2 \cdot R_{\max}}\right)\right).$$

Кроме угла ограничения подъёма манипулятора φ'_d при определении величины $V_{\text{конт}}$ (а фактически, его части; рис. 2, б) необходимо учесть, что в данный объём не должна входить часть сферического рабочего пространства, расположенного в зоне рельсошпальной решётки (рис. 2, в). Таким образом, часть объёма сферического рабочего пространства $V_{\text{конт}}'$, находящегося в зоне контактной сети, найдётся как:

$$V_{\text{конт}} = V_{\max}^{\text{конт}} - V_{\min}^{\text{конт}} - V_{\text{конт}}'$$

где часть шарового сектора сферического рабочего пространства $V_{\text{конт}}'$, расположенного в зоне рельсошпальной решётки (рис. 2, г), найдётся как:

$$= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(1 - \frac{\varphi_{\max_мн} + \arcsin \frac{B_{раб}}{2 \cdot R_{\max}}}{90} \right) \cdot \sin \frac{\varphi_{\partial}}{2} \cdot (R_{\max}^3 - R_{\min}^3).$$

В данном выражении угол дороги φ_{∂} , определяемый точкой пересечения проекции оси симметрии манипулятора с внутренней гранью головки рельса и минимальным радиусом работы R_{\min} , найдётся как:

$$\sin \frac{\varphi_{\partial}}{2} = \frac{B_{жд} / 2}{R_{\min}} = \frac{B_{жд}}{2 \cdot R_{\min}},$$

где $B_{жд}$ – ширина железнодорожной колеи.

С учётом вышеизложенного, после преобразований часть объёма сферического рабочего пространства, находящегося в зоне контактной сети, $V_{конт}$ определится как:

$$V_{конт} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (R_{\max}^3 - R_{\min}^3) \times \left(\left(1 - \cos \left(90 - \varphi_{\max_мн} - \arcsin \frac{B_{раб}}{2 \cdot R_{\max}} \right) \right) - \left(1 - \frac{\varphi_{\max_мн} + \arcsin \frac{B_{раб}}{2R_{\max}}}{90} \right) \frac{B_{жд}}{2R_{\min}} \right).$$

Одним из возможных типов манипуляторов, которые могут быть использованы для удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности с полосы отвода железных дорог, является малозвенный манипулятор (рис. 5, а). Он представляет собой платформу 1 с поворотной стойкой 2 и корпусом 3, внутри которого возвратно-поступательно перемещается шток 4. На конце штока установлено рабочее оборудование 5 (в данном случае – роторный рабочий орган типа «мульчер»). При этом в общем случае роторный рабочий орган будет иметь следующие геометрические размеры (рис. 5, б): $B_{раб}$ (ширина захвата рабочего органа), $H_{раб}$ (высота рабочего оборудования) и $D_{раб}$ (ширина режущей кромки рабочего оборудования, равная в случае установки так называемого роторного «мульчера» диаметру его ротора D_r).

Для определения максимального R_{\max} и минимального R_{\min} радиусов работы характерной точки рабочего органа, установленно-

го на конце вышеприведённого малозвенного манипулятора, составим его кинематическую схему, определяющую фактический объём сферического рабочего пространства $V_{факт}$ в полосе отвода железных дорог (рис. 6).

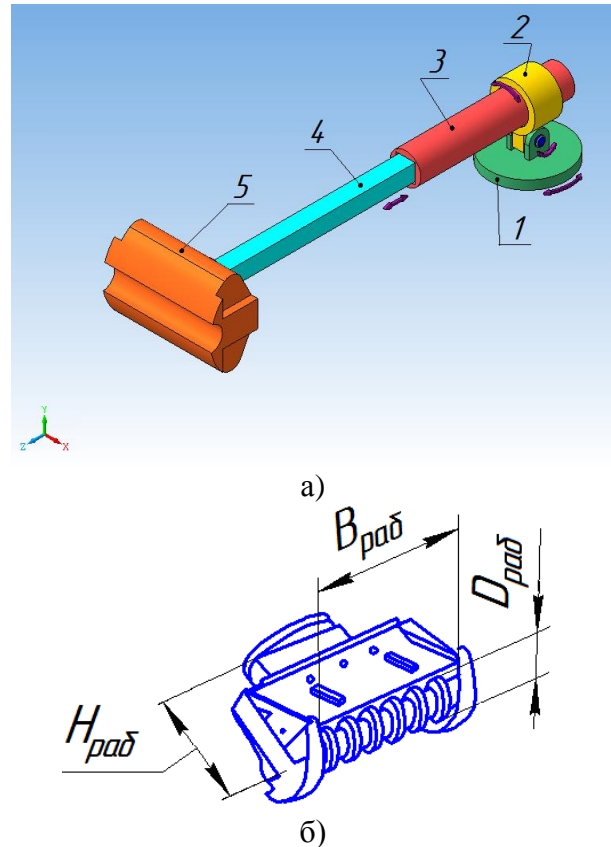


Рис. 5. Малозвенный манипулятор с рабочим оборудованием

На основе анализа данной схемы выявим характерные точки, местоположение которых формирует рабочее пространство манипулятора в полосе отвода железных дорог.

Местоположение любой точки рабочего органа может быть определено с учётом её координат в пространстве относительно базовой системы координат $O_0 X_0 Y_0 Z_0$.

Рабочее пространство, представляющее собой сферу с центром в точке O_1 , определяется местоположением ряда характерных точек роторного рабочего органа, лежащими в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротора (при показанном положении рабочего

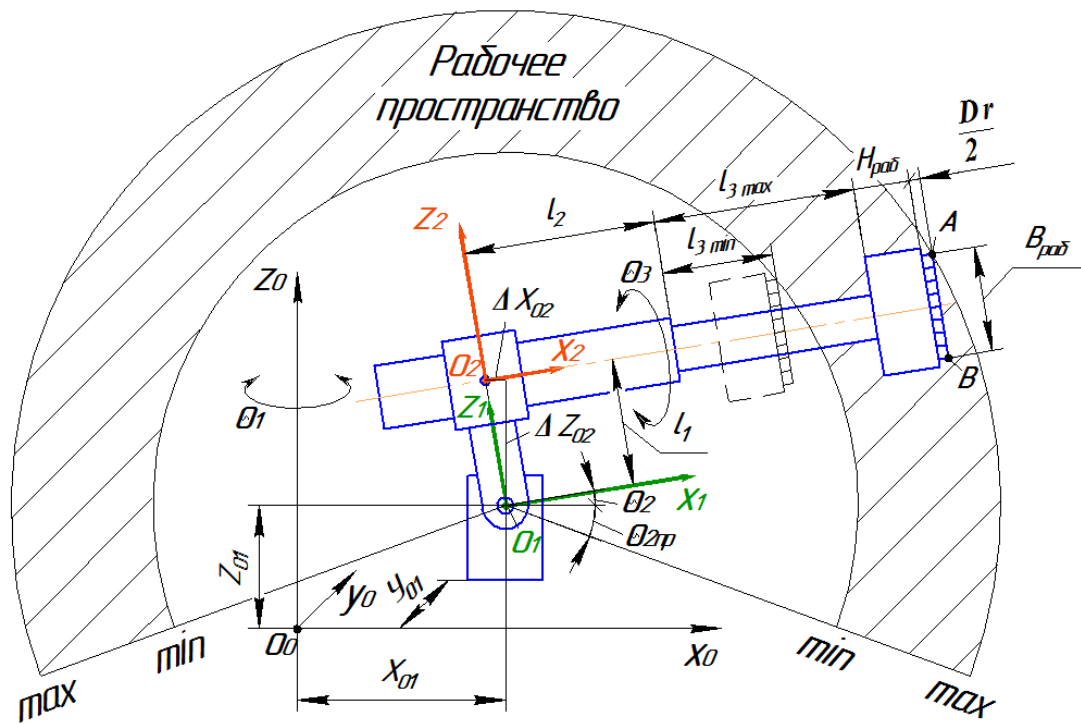


Рис. 6. Схема формирования рабочего пространства манипулятора с роторным рабочим органом

органа – в плоскости $O_2X_2Y_2$). Такими характерными точками являются точки А и В рабочего органа (точки, проекции которых в плоскости $O_2X_2Z_2$ максимально удалены от точки O_2). Исследование схемы определения рабочего пространства позволило установить, что относительно начального (показанного на схеме) положения роторного рабочего органа точка А при любом повороте данного органа на угол $\pm 90^\circ$ обеспечивает максимальный (минимальный) объём сферического рабочего пространства в зависимости от величины выдвигания штока манипулятора. При повороте рабочего органа на угол $90 \dots 180^\circ$ точки А и В взаимно заменяют друг друга. Таким образом, анализ вышеприведённой схемы позволяет принять к исследованию точку А (в дальнейшем – «характерную точку»).

Максимальное удаление характерной точки от начала базовой системы координат O_0 , определяющее при этом максимальный радиус рабочего пространства, определится как:

$$R_{\max} = \sqrt{(X_{0o\max})^2 + (Z_{0o\max})^2},$$

где $X_{0o\max}$, $Z_{0o\max}$ – координаты, определяющие месторасположение характерной точки соответственно вдоль осей X_0 и Z_0 .

Минимальное удаление характерной точки от начала базовой системы координат O_0 , определяющее при этом минимальный радиус рабочего пространства, определится как:

$$R_{\min} = \sqrt{(X_{0o\min})^2 + (Z_{0o\min})^2},$$

где $X_{0o\min}$, $Z_{0o\min}$ – координаты, определяющие месторасположение характерной точки соответственно вдоль осей X_0 и Z_0 .

Сферическое рабочее пространство формируется совокупностью точек, местоположение которых может быть определено координатным способом, при этом значения соответствующих координат (X_{0oi} , Y_{0oi} , Z_{0oi}) будут находиться в диапазонах:

$$\begin{cases} X_{0o\min} \leq X_{0oi} \leq X_{0o\max} \\ Y_{0o\min} \leq Y_{0oi} \leq Y_{0o\max} \\ Z_{0o\min} \leq Z_{0oi} \leq Z_{0o\max} \end{cases}.$$

Максимальная координата характерной точки вдоль оси X_0 может быть определена как

$$X_{0o\max} = X_{01} + \left(l_2 + l_{3\max} + H_{роб} + \frac{D_r}{2} \right) \cos \Theta_2 - \Delta X_{O2} - B_{роб}^* \cdot \sin \Theta_2,$$

где приращение перемещения точки O_2 вдоль оси OX $\Delta X_{O2} = l_1 \sin \Theta_2$.

В данных формулах X_{01} – координата расположения центра поворотной платформы манипуляторной установки относительно базовой системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$; l_1 – высота расположения поворотного корпуса манипулятора над точкой поворота поворотной стойки; l_2 – вылет поворотного корпуса манипулятора; $l_{3\max}$ – максимальная величина выдвигания штока манипулятора; $B_{раб}^*$ – динамическая ширина захвата роторного рабочего органа; Θ_2 – угол поворота поворотной стойки манипуляторной установки вокруг оси O_1Y_1 в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$; Θ_3 – угол поворота рабочего оборудования вокруг оси O_2X_2 в системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$.

Максимальная координата характерной точки вдоль оси Z_0 может быть определена как

$$Z_{0o\max} = Z_{01} + \left(l_2 + l_{3\max} + H_{раб} + \frac{D_r}{2} \right) \sin \Theta_2 + \Delta Z_{O2} + B_{раб}^* \cdot \cos \Theta_2,$$

где приращение перемещения точки O_2 вдоль оси OZ $\Delta Z_{O2} = l_1 \cos \Theta_2$.

В данном выражении Z_{01} – координата расположения центра поворотной платформы манипуляторной установки относительно базовой системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$.

Минимальная координата характерной точки вдоль оси X_0 может быть определена как

$$X_{0o\min} = X_{01} + \left(l_2 + l_{3\min} + H_{раб} + \frac{D_r}{2} \right) \cos \Theta_2 - \Delta X_{O2} - B_{раб}^* \cdot \sin \Theta_2,$$

где $l_{3\min}$ – минимальная величина выдвигания штока манипулятора.

Минимальная координата характерной точки вдоль оси Z_0 может быть определена как

$$Z_{0o\min} = Z_{01} + \left(l_2 + l_{3\min} + H_{раб} + \frac{D_r}{2} \right) \sin \Theta_2 + \Delta Z_{O2} + B_{раб}^* \cdot \cos \Theta_2.$$

При необходимости установления в любой момент времени местоположения в пространстве характерной точки роторного рабочего органа может быть использован (как уже отмечалось ранее) координатный способ, при котором текущие значения координат X_{0oi} , Y_{0oi} и Z_{0oi} будут определяться следующим образом.

Текущая координата характерной точки вдоль оси X_0 определится как

$$X_{0oi} = X_{01} + \left(l_2 + l_{3i} + H_{раб} + \frac{D_r}{2} \right) \cos \Theta_2 - \Delta X_{O2} - B_{раб}^* \cdot \sin \Theta_2,$$

где l_{3i} – текущая величина выдвигания штока манипулятора.

Текущая координата характерной точки вдоль оси Y_0 определится как

$$Y_{0oi} = Y_{01} + X_{0oi} \cdot \sin \Theta_1,$$

где Y_{01} – координата расположения центра поворотной платформы манипуляторной установки относительно базовой системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$; Θ_1 – угол поворота поворотной платформы манипуляторной установки вокруг оси O_0Z_0 в базовой системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$.

Текущая координата характерной точки вдоль оси Z_0 определится как

$$Z_{0o\min} = Z_{01} + \left(l_2 + l_{3\min} + H_{раб} + \frac{D_r}{2} \right) \sin \Theta_2 + \Delta Z_{O2} + B_{раб}^* \cdot \cos \Theta_2.$$

Вывод. Рассмотренные выше зависимости позволяют определить часть фактического объема сферического рабочего пространства и, в целом, предоставляют возможность создать обобщенную динамическую модель формирования рабочего пространства манипулятором с рабочим органом, установленным на транспортном средстве и приводимом в действие для удаления с его помощью с полосы отвода железных дорог нежелательной древесно-кустарниковой растительности.

Список литературы

1. Приказ Министерства путей сообщения РФ № 26Ц «Об утверждении Положения о порядке использования земель федераль-

ного железнодорожного транспорта в пределах полосы отвода железных дорог» от 15.05.1999. – Зарегистрирован в Минюсте РФ от 27 июля 1999 г. № 1848.

2. Казанский, В.Д. Способы борьбы с нежелательной древесно-кустарниковой растительностью при эксплуатации автомобильных дорог / В.Д. Казанский // Автомобильные дороги: Обзорн. информ. Вып. № 4. – М.: Информ-автодор, 1987. – 65 с.

3. Редькин, А.К. Технология и оборудование лесозаготовок / А.К. Редькин, В.Д. Никишов, С.Н. Смехов. – М.: МГУЛ, 2010. – 178 с.

4. Платонов, А.А. Программный комплекс для моделирования работы машин по удалению нежелательной растительности / А.А. Платонов, М.А. Платонова // Автоматизация и управление в технических системах. – 2016. – № 1. URL: auts.esrae.ru/18-370 (дата обращения: 01.08.2017).

5. Theodoridis, D.C. A New Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Trajectory Tracking of Robot Manipulators / D.C. Theodoridis, Y.S. Boutalis, M.A. Christodoulou // International Journal of Robotics and Automation. – 2011. – Т. 26. – № 1. – С. 64-75.

6. Платонов, А.А. Организация работ по удалению нежелательной древесно-кустарниковой растительности в полосе отвода железных дорог / А.А. Платонов // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – Т.1. – № 1. – С. 17-23.

7. Крейнис, З.Л. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути / З.Л. Крейнис, Н.Е. Селезнева. – М.: УМЦ ЖДТ, 2012. – 568 с.

Об авторе

Платонов Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», paa7@rambler.ru.

THE ELEMENTS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF EDUCATION OF THE SPHERICAL WORKING SPACE BY MANIPULATORY MACHINES

Platonov A.A.

Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

At present, JSCo «Russian Railways» forms a coordinated policy in the field of ensuring the safety and reliability of the transportation process, one of the topical issues being the removal of undesirable woody and shrubby vegetation in the railroad outflow zone. To improve the efficiency of removal of undesired bedrock, as well as branches and stumps, to reduce the proportion of manual labor and to facilitate the working conditions of personnel, the author of the article studied resource-saving, small-scale compact mechanization tools that allow them to be used in Hard-to-reach places. These means of mechanization were considered in conjunction with modern vehicles, which can provide them with the necessary energy, both on the railway track and away from it. To improve labor productivity and quality of strip removal, working bodies are used, which are aggregated with vehicles equipped with manipulator plants. The article deals with the modeling of the spherical working space of manipulator machines in the railroad take-off zone, taking into account the division of the actual volume of the given space into a number of zones. Calculation schemes of manipulators for the mathematical description of the motion of their links in terms of and profile of the railway were compiled, and a scheme for the dynamic interaction of the rotor working organ with tree and shrub vegetation is given. The schemes of formation and limitation of the working space of a low-end manipulator with a rotor working body are given. A conclusion is drawn on the prospects of obtaining, in view of the above elements of the mathematical model, a number of important practical recommendations for an entire system of machines possessing certain common properties.

Keywords: *railroad, strip of diversion, undesirable vegetation, modeling.*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-48-55

References

1. Prikaz Ministerstva putey soobshheniya RF № 26С «Ob utverzhdenii Polozheniya o porядке ispolzovaniya zemel federalnogo zhelezodorozhnogo transporta v predelakh polosy otvoda zheleznykh dorog» ot 15.05.1999. – Zaregistrovan v Minyuste RF ot 27 ijulja 1999 g. № 1848. (In Russian)

2. Kazanskiy V.D. *Sposoby borby s nezhelatelnoy drevesno-kustarnikovoy rastitelnostyu pri ekspluatatsii avtomobilnykh dorog. Avtomobilnye dorogi: Obzornaya informatsiya*, Vol.4. Moscow, Informavtodor, 1987. 65 p. (In Russian)

3. Redkin A.K., Nikishov V.D., Smekhov S.N. *Tekhnologiya i oborudovanie lesozagotovok*. Moscow, MGUL, 2010. 178 p. (In Russian)

4. Platonov A.A., Platonova M.A. Programmnyy kompleks dlya modelirovaniya raboty mashin po udalenyju nezhelatelnoy rastitelnosti. *Avtomatizatsiya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh*, 2016, No.1. URL: auts.esrae.ru/18-370. (In Russian)

5. Theodoridis D.C., Boutalis Y.S., Christodoulou M.A. A New Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Trajectory Tracking of Robot Manipulators. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, Vol.26, No.1, pp. 64-75.

6. Platonov A.A. Organizatsiya rabot po udalenyju nezhelatelnoy drevesno-kustarni-kovoy rastitelnosti v polose otvoda zheleznykh dorog. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2016, Vol.1, No.1, pp. 17-23. (In Russian)

7. Kreynis Z.L., Selezneva N.E. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont zheleznodorozhnogo puti*. Moscow, UMC ZhDT, 2012. 568 p. (In Russian)

Author' information

Aleksey A. Platonov – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Rostov State Transport University, paa7@rambler.ru.

Area of scientific interests (research direction): creation of new technologies and technical means for increasing the efficiency of maintenance and maintenance of the railway track.

Дата принятия к публикации
(Date of acceptance for publication)
08.12.2017

Дата публикации
(Date of publication):
25.03.2018

