

УДК 621.865

DOI: 10.30987/article_5d6cbe42247be1.64247013

Л.Ю. Ворочаева, С.И. Савин, А.С. Яцун

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕНА ПОЛЗАЮЩЕГО РОБОТА С ПРЕПЯТСТВИЕМ

Разработан набор правил работы системы определения режима контакта звена ползающего робота с препятствием при движении звена по горизонтальной плоскости относительно неподвижной опоры и моделирования препятствия в форме прямоугольника. Определены условия возникнове-

ния различных режимов контакта, установлена необходимость корректировки движения звена в каждом из этих случаев.

Ключевые слова: ползающий робот, звено робота, управление трением, препятствие, режим контактного взаимодействия.

L.Yu. Vorochaeva, S.I. Savin, A.S. Yatsun

SYSTEM DEVELOPMENT FOR DEFINITION OF CONTACT INTERACTION MODE IN LINK OF SLIDING ROBOT WITH OBSTACLE

The paper is dedicated to the problems of a link motion in a sliding robot on a horizontal surface with obstacles. The motion of a robot link is under consideration in case when one of its bearings located in utmost points is fixed on the surface and the second slips, that is, a link moves on an arc of a circle, at that a robot itself changes its configuration. A distinguishing peculiarity and advantage of this work is that in it there is no consideration of a specific design circuit of a sliding robot with the definite link number and type of swing joints between them, but a link turn on the plane under condition of the presence of mobility rotating degree in a hinge connecting links and friction control in bearings is only considered.

In the work there is offered a four-level system for motion control of a robot link on a surface with obstacles where each of them is modeled in a rectangular form. A system for the mode definition of a link

contact with an obstacle is considered thoroughly, the following possible modes are emphasized: the interaction of utmost points of a link and an obstacle, the utmost point of the link with the point on an obstacle side, a certain point of a link with the utmost point of the obstacle, a link with the obstacle side and the absence of the contact of a link and an obstacle. For each of the modes mentioned there are written conditions for its occurrence and also a necessity of link motion updating in order to surmount obstacles (a set of regulations for a system operation) is defined. The information on updating necessity comes to a corresponding level of the control system and then to the system of robot driving gear control that allows realizing such a link motion which ensures overcoming obstacles.

Key words: sliding robot, robot link, friction control, obstacle, mode of contact interaction.

Введение

Области применения многозвенных ползающих роботов различны. Одной из перспективных и активно развиваемых в настоящее время областей является их использование для проведения поиска людей под завалами после обрушения зданий в результате землетрясений, наводнений, взрывов и т.д. Это обусловлено их высокой проходимостью по различным поверхностям с препятствиями.

Конструкции разрабатываемых ползающих роботов различны, так же как и число используемых в них звеньев, шарнирных соединений, реализуемых ими движений и т.д. [1]. В работах [2; 3] рассматриваются роботы-змеи, построенные

на биомеханических принципах, в статьях [4; 5] описывается движение змееподобных роботов на плоскости, учитывающее ограничения, накладываемые на скольжение устройства, а в [6] – движение без учета таких ограничений. Большое число статей посвящено изучению движения ползающих роботов по поверхностям с препятствиями [7; 8].

Целью данной работы является рассмотрение движения звена некоторого многозвенного ползающего робота по поверхности с препятствиями (без привязки к конкретной конструкции устройства), а также разработка набора правил работы системы управления устройством, позво-

ляющих определять возможность преодоления препятствия и необходимость кор-

Описание ползающего робота и препятствия

Как было указано выше, ползающие роботы имеют большое число разнообразных конструкций, различающихся по числу звеньев и типам шарнирных соединений между ними. В данной работе не будем привязываться к конкретному объекту исследования, т.е. ползающему роботу с определенным числом звеньев и заданными шарнирными соединениями. Будем рассматривать звено OO_1 некоторого ползающего робота (рис. 1а), отличительной особенностью которого является расположение в точке O опорного элемента с управляемым коэффициентом трения, например аналогичного описанному в [9; 10], где коэффициент трения может принимать значения f_{\min} / f_{\max} за счет смены опорных поверхностей. Варьирование коэффициента трения позволяет данной опоре периодически фиксироваться на поверхности при f_{\max} . Звено OO_1 при этом движется по дуге окружности, радиус которой равен длине звена L , изменяя тем самым конфигурацию робота. Во второй

ректировки движения.

опоре звена – точке O_1 – коэффициент трения равен f_{\min} , что позволяет ей скользить по поверхности. На рис. 1а зафиксированная опора O обозначена как ●, а подвижная O_1 как ○. Пусть движение звена робота происходит в горизонтальной плоскости, точка O устройства совпадает с началом абсолютной системы координат Oxy , $\mathbf{r}_O = (0 \ 0)^T$. Звено робота располагается под углом φ , отсчитываемым против часовой стрелки от положительного направления оси Ox . Тогда определение координат любой точки звена требует введения матрицы поворота

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Радиус-вектор точки O_1

$$\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{T}\mathbf{p}_{OO_1}, \mathbf{p}_{OO_1} = (L \ 0)^T,$$

где \mathbf{p}_{OO_1} – относительный радиус-вектор в системе координат, связанной со звеном робота.

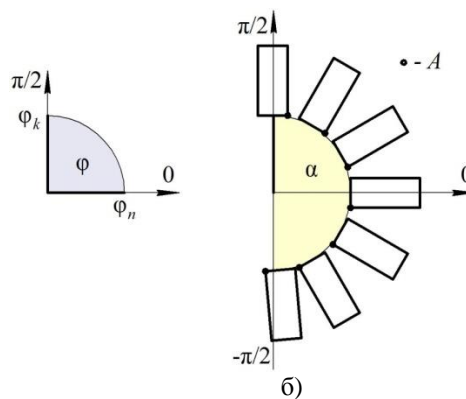
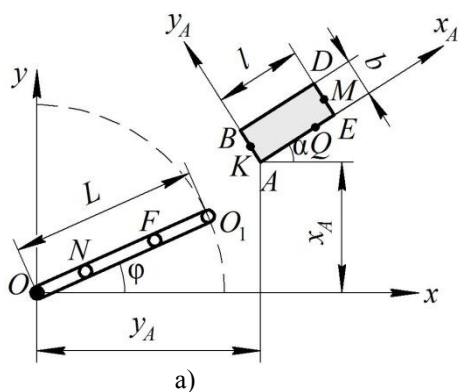


Рис. 1. Расчетная схема звена ползающего робота и препятствия (а) и диапазоны углов φ и α (б)

Встречающиеся на пути следования ползающего робота препятствия могут иметь различные форму и размеры. В данной работе ограничимся рассмотрением одного из наиболее часто встречающихся препятствий – имеющего в плоскости Oxy форму прямоугольника. Препятствие $ABDE$ имеет размеры $l \times b$, его положение на плоскости описывается радиусом-

вектором $\mathbf{r}_A = (x_A \ y_A)^T$ точки A и углом α наклона стороны AE к оси Ox .

Радиусы-векторы остальных точек – вершин препятствия – определяются с учетом матрицы поворота \mathbf{T}_A и относительных радиусов-векторов $\mathbf{p}_{AB}, \mathbf{p}_{AD}, \mathbf{p}_{AE}$

вершин препятствия в системе координат Ax_Ay_A :

$$\mathbf{T}_A = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{T}_A \mathbf{p}_{AB}, \mathbf{p}_{AB} = (0 \ b)^T, \mathbf{r}_D = \mathbf{T}_A \mathbf{p}_{AD}, \mathbf{p}_{AD} = (l \ b)^T, \mathbf{r}_E = \mathbf{T}_A \mathbf{p}_{AE}, \mathbf{p}_{AE} = (l \ 0)^T.$$

Диапазоны изменения углов ориентации звена и препятствия на плоскости равны (рис. 1б):

$$\varphi \in [\varphi_n, \varphi_k], \quad (0 \leq \varphi_n) \wedge (\varphi_n < \varphi_k) \wedge (\varphi_k \leq \pi/2),$$

$$\alpha \in (-\pi/2, \pi/2],$$

где φ_n, φ_k – начальное и конечное значения угла поворота звена робота, определяемые его походкой, причем оба значения располагаются в первой четверти. На данном и последующих рисунках при построении диапазонов углов тонкая линия соответствует знаку $>$ или $<$, а основная – знаку \geq или \leq .

Сформулируем цель работы. Пусть звено ползающего робота во время изменения конфигурации последнего движется по поверхности с препятствиями, каждое из которых моделируется прямоугольником $ABDE$. Целью исследования является разработка системы правил, позволяющих установить, возможно ли преодоление данного препятствия без корректировки движения звена.

Система управления звеном робота

На рис. 2 приведена схема четырехуровневой системы управления звеном робота. В данной схеме можно выделить следующие системы: распознавания препятствия, определения режима контактного взаимодействия с препятствием, корректировки движения звена, управления приводами робота. Система распознавания препятствия является системой верхнего уровня. Данная система позволяет определить расположение препятствия на поверхности, его форму и размеры. В рассматриваемом случае, когда препятствия моделируются прямоугольниками, в качестве информации, передаваемой системой распознавания препятствия в систему

определения режима контактного взаимодействия с препятствием, выступают координаты точки A , размеры препятствия и угол его ориентации в плоскости Oxy : x_A, y_A, l, b, α . Система второго уровня (определения режима взаимодействия с препятствием) устанавливает, происходит ли контакт звена робота с препятствием, и если происходит, то каким именно образом (контакт точки звена с точкой препятствия, контакт звена со стороной препятствия). Для определения режима контакта с препятствием в этой системе используется набор правил, разработка которого и является целью настоящей работы.

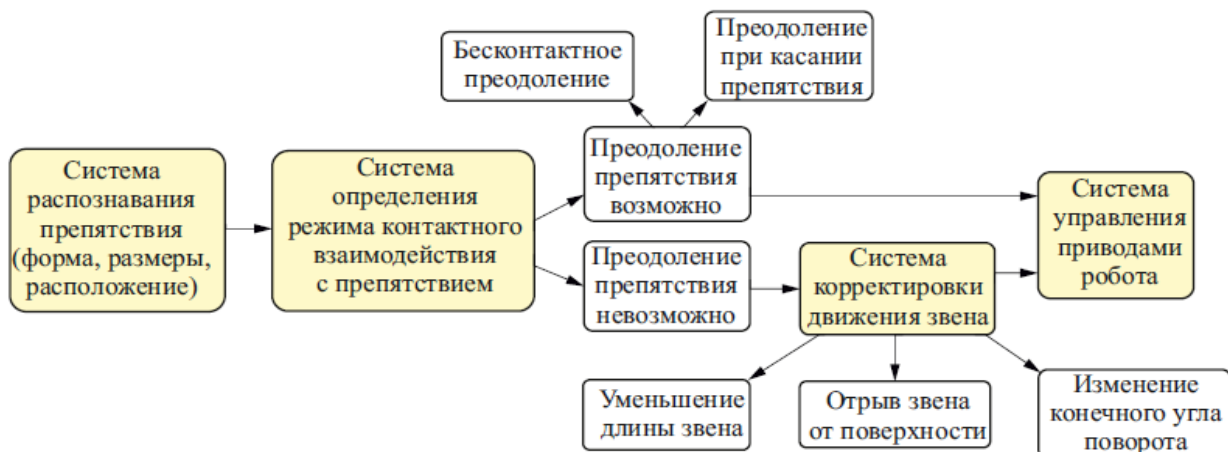


Рис. 2. Схема САУ движением звена ползающего робота

В результате работы данной системы принимается решение о возможности или невозможности преодоления препятствия, причем преодолеть препятствие можно как бесконтактно (когда ни одна точка звена во время движения не касается препятствия), так и при касании точкой звена некоторой точки препятствия. Если преодоление препятствия невозможно, информация о режиме контакта, мешающего движению звена, передается в систему корректировки (третий уровень). Эта система содержит набор правил, позволяющих скорректировать движение звена таким образом, чтобы препятствие можно было преодолеть. Наиболее распространенными вариантами корректировки выступают следующие: уменьшение длины звена, отрыв звена от поверхности и изменение ко-

нечного значения угла поворота, а также их комбинации. Данные о корректируемых параметрах и их величинах поступают в систему управления приводами робота (четвертый уровень), где используются для построения требуемой траектории движения звена. Если же корректировка не требуется, то сведения о варианте преодоления препятствия передаются в систему управления приводами. Данная система определяет законы изменения моментов и сил приводов, осуществляющих перемещение звена устройства, и обеспечивает движение звена в заданную конечную точку. Здесь остановимся на рассмотрении принципа работы только одной из систем, а именно системы определения режима контактного взаимодействия с препятствием.

Система определения режима контактного взаимодействия с препятствием

Для описания работы системы определения режима контакта звена робота с препятствием введем следующие точки.

$$\mathbf{r}_N = \mathbf{T}\mathbf{p}_{ON}, \quad \mathbf{p}_{ON} = (L_N \ 0)^T,$$

где \mathbf{p}_{ON} , \mathbf{p}_{OF} – соответствующие относительные радиусы-векторы в системе координат звена; L_N , L_F – расстояния между точками O и N , O и F соответственно.

Также введем точки K , M , Q , принадлежащие сторонам препятствия ($K \in AB$, $M \in DE$, $Q \in AE$), которые будут необхо-

Пусть звену OO_1 принадлежат точки N и F , их радиусы-векторы записываются следующим образом:

$$\mathbf{r}_F = \mathbf{T}\mathbf{p}_{OF}, \quad \mathbf{p}_{OF} = (L_F \ 0)^T,$$

димы для описания режимов взаимодействия звена робота с последним. Радиусы-векторы данных точек записываются с использованием соответствующих относительных радиусов-векторов \mathbf{p}_{AK} , \mathbf{p}_{AM} , \mathbf{p}_{AQ} :

$$\mathbf{r}_K = \mathbf{T}_A\mathbf{p}_{AK}, \quad \mathbf{p}_{AK} = (0 \ b_K)^T, \quad \mathbf{r}_D = \mathbf{T}_A\mathbf{p}_{AD}, \quad \mathbf{p}_{AM} = (l \ b_M)^T, \quad \mathbf{r}_Q = \mathbf{T}_A\mathbf{p}_{AQ}, \quad \mathbf{p}_{AQ} = (l_Q \ 0)^T.$$

На рис. 3 приведена классификация режимов взаимодействия звена робота с препятствием. В случае наличия контакта он может происходить точкой звена (крайней точкой O_1 или некоторой точкой N звена) или непосредственно звеном OO_1 . Взаимодействие точки O_1 может осуществляться с крайними точками (вершинами) препятствия или с точками, принад-

лежащими его сторонам, причем точка N звена может контактировать только с крайними точками препятствия, а звено OO_1 – со сторонами препятствия. Справа от каждого режима контакта введено условное обозначение возможности преодоления препятствия с корректировкой или без нее. Также возможно бесконтактное преодоление препятствия.

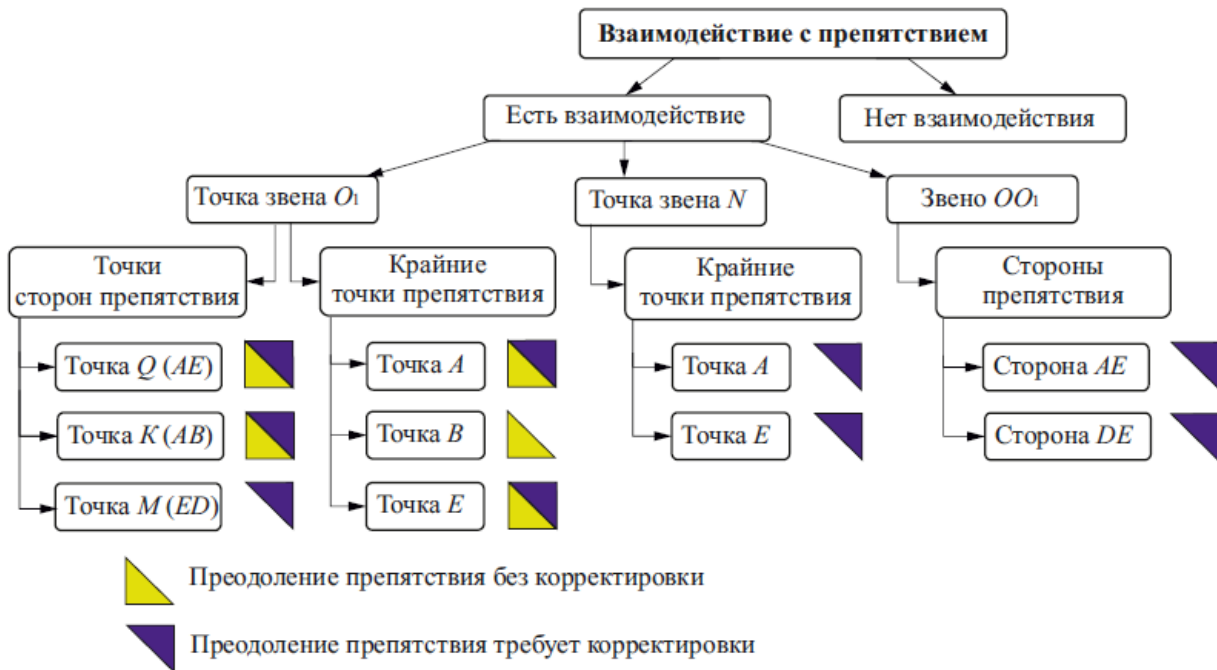


Рис. 3. Классификация режимов контактного взаимодействия с препятствием

Рассмотрим каждый из режимов контакта с препятствием. Для удобства их идентификации введем следующие обозначения: $n=1, 2$ – для преодоления препятствия требуется корректировка движения звена, $n=3, 4$ – преодоление препятствия при его касании, $n=5$ – бесконтактное преодоление препятствия.

$$n = \begin{cases} 1 \vee 3, & 0 \leq \alpha \leq \pi/2, \\ 2 \vee 4, & -\pi/2 < \alpha < 0, \\ 5, & -\pi/2 < \alpha \leq \pi/2. \end{cases}$$

$$n_{O_1-A} = \begin{cases} 1, & \text{if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_A) \wedge (\varphi_n < \alpha \leq \pi/2) \wedge (\alpha_p > \varphi_p), \\ 3, & \text{if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_A) \wedge (0 \leq \alpha \leq \varphi_k) \wedge (\alpha_p \leq \varphi_p), \\ 4, & \text{if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_A) \wedge ([\varphi_n - \pi/2] \leq \alpha < 0) \wedge (\alpha_p \geq [\varphi_p - \pi/2]). \end{cases}$$

Здесь α_p, φ_p – значения углов ориентации препятствия и звена в момент их контакта.

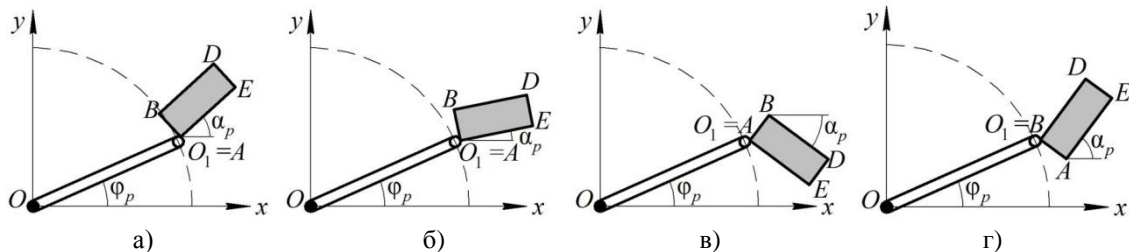


Рис. 4. Режимы контактного взаимодействия точек: а-в – $O_1 - A$ (а – $n=1$, б – $n=3$, в – $n=4$); г – $O_1 - B$ ($n=3$)

Взаимодействие точек O_1 звена и B препятствия ($v=2$) всегда происходит так, что препятствие возможно преодолеть без

Контакт крайней точки звена с крайней точкой препятствия. Взаимодействие точек O_1 звена и A препятствия ($v=1$) возможно тремя способами (рис. 4а-в), один из которых требует корректировки ($n=1$), а два других – нет ($n=3, 4$). Условия выполнения каждого из режимов контакта записываются следующим образом:

корректировки движения звена (рис. 4г). Соответствующее условие контакта записывается следующим образом:

$$n_{O_1-B} = 3, \text{ if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_B) \wedge (\varphi_n \leq \alpha \leq \pi/2) \wedge (\alpha_p \geq \varphi_p).$$

Режимы взаимодействия крайних точек звена O_1 и препятствия E ($v=3$) приведены на рис. 5. Здесь можно выделить три режима контакта, два из которых требуют корректировки движения звена, при одном

из них $\alpha \geq 0$ ($n=1$), а при другом $\alpha < 0$ ($n=2$). Третий режим ($n=4$) обеспечивает преодоление этого препятствия путем его касания.

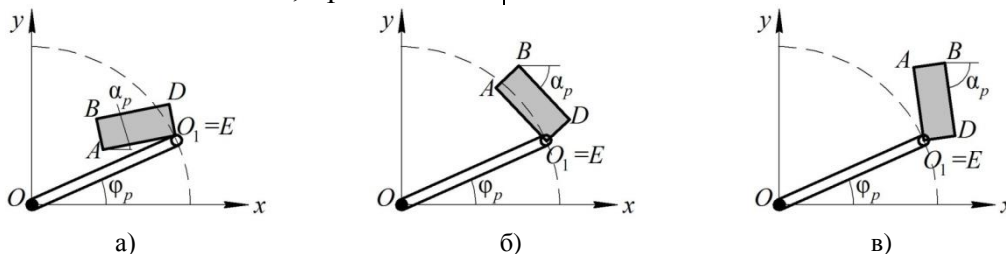


Рис. 5. Режимы контактного взаимодействия точек $O_1 - E$: а - $n=1$; б - $n=2$; в - $n=4$

Условия режимов контакта описываются формулами:

$$n_{O_1-E} = \begin{cases} 1, \text{ if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_E) \wedge (0 \leq \alpha < \varphi_k) \wedge (\alpha_p < \varphi_p), \\ 2, \text{ if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_E) \wedge ([\varphi_n - \pi/2] < \alpha < 0) \wedge (\alpha_p > [\varphi_p - \pi/2]), \\ 4, \text{ if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_E) \wedge (-\pi/2 < \alpha \leq [\varphi_k - \pi/2]) \wedge (\alpha_p \leq [\varphi_p - \pi/2]). \end{cases}$$

Контакт крайней точки звена с точкой стороны препятствия. Взаимодействие точки O_1 звена с точкой Q препятствия ($v=4$), принадлежащей стороне

AE , возможно тремя способами (рис. 6), два из которых требуют корректировки ($n=1, 2$), а третий ($n=4$) – нет.

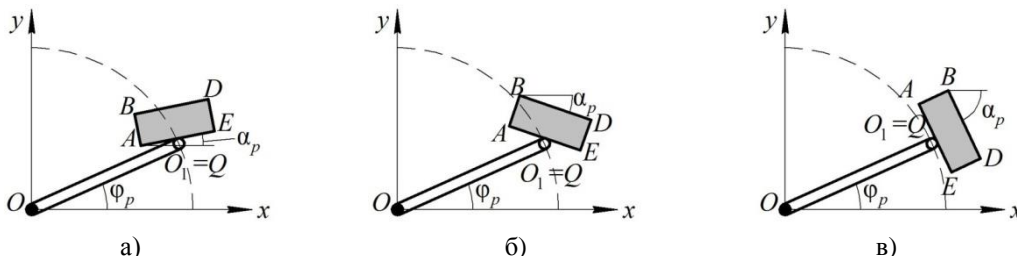


Рис. 6. Режимы контактного взаимодействия точек $O_1 - Q$: а - $n=1$; б - $n=2$; в - $n=4$

Условия режимов контакта:

$$n_{O_1-Q} = \begin{cases} 1, \text{ if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_Q) \wedge (0 \leq \alpha < \varphi_k) \wedge (\alpha_p < \varphi_p), \\ 2, \text{ if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_Q) \wedge ([\varphi_n - \pi/2] < \alpha < 0) \wedge (\alpha_p > [\varphi_p - \pi/2]), \\ 4, \text{ if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_Q) \wedge ([\varphi_n - \pi/2] \leq \alpha < [\varphi_k - \pi/2]) \wedge (\alpha_p = [\varphi_p - \pi/2]). \end{cases}$$

Следует отметить, что вариант преодоления препятствия без корректировки возможен только в том случае, если сторона AE препятствия перпендикулярна звену OO_1 в положении, когда точки O_1 и Q соприкасаются.

Контакт точки O_1 звена и точки K ($v=5$), принадлежащей стороне AB препят-

ствия, может происходить двумя способами: при корректировке ($n=1$) и без нее ($n=3$) (рис. 7а, б). Причем корректировка не требуется только в том случае, когда сторона AB препятствия перпендикулярна звену OO_1 при касании точек O_1 и K .

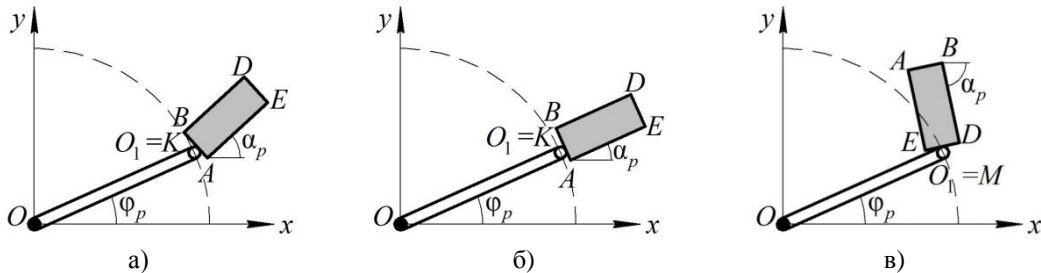


Рис. 7. Контакт точек: а, б – $O_1 - K$ (а – $n=1$, б – $n=3$); в – $O_1 - M$ ($n=2$)

Условия двух режимов контакта:

$$n_{O_1-K} = \begin{cases} 1, & \text{if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_K) \wedge (\varphi_n < \alpha \leq \pi/2) \wedge (\alpha_p > \varphi_p), \\ 3, & \text{if } (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_K) \wedge (\varphi_n \leq \alpha \leq \varphi_k) \wedge (\alpha_p = \varphi_p). \end{cases}$$

Взаимодействие точки O_1 звена и точки M ($v=6$), расположенной на стороне ED препятствия, возможно только одним

$$n_{O_1-M} = 2, \text{ if } ((\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_M) \wedge (-\pi/2 < \alpha < [\varphi_k - \pi/2]) \wedge (\alpha_p < [\varphi_p - \pi/2])).$$

Контакт точки звена N с крайней точкой препятствия. Перейдем к рассмотрению режима взаимодействия некоторой точки звена N с крайней точкой пре-

способом, требующим корректировки движения звена ($n=2$) (рис. 7в). Условие контакта записывается в виде

пятствия A ($v=7$). В этом случае преодоление препятствия возможно только после корректировки движения звена ($n=1$) (рис. 8а).

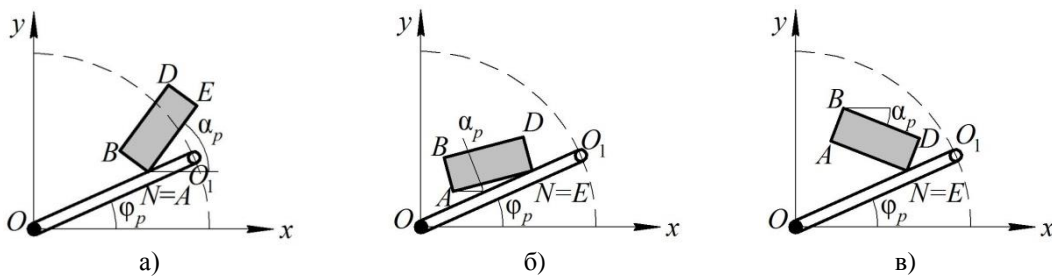


Рис. 8. Режимы контактного взаимодействия точек: а – $N - A$ ($n=1$); б, в – $N - E$ (б – $n=1$, в – $n=2$)

Условие реализации этого режима контакта записывается следующим образом:

$$n_{N-A} = 1, \text{ if } (\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_A) \wedge (\varphi_n < \alpha \leq \pi/2) \wedge (\alpha_p > \varphi_p).$$

Режимы контакта точки N звена с точкой E препятствия ($v=8$) представлены на рис. 9б, в. Оба режима требуют корректировки движения звена, в одном случае

$\alpha \geq 0$ ($n=1$), в другом $\alpha < 0$ ($n=2$). Условия режимов контакта точек N и E записываются следующим образом:

$$n_{N-E} = \begin{cases} 1, & \text{if } (\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_E) \wedge (0 \leq \alpha < \varphi_k) \wedge (\alpha_p < \varphi_p), \\ 2, & \text{if } (\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_E) \wedge ([\varphi_n - \pi/2] < \alpha < 0) \wedge (\alpha_p > [\varphi_p - \pi/2]). \end{cases}$$

Контакт звена робота со стороной препятствия. Перейдем к рассмотрению взаимодействия звена со сторонами препятствия. Вначале рассмотрим контакт со стороной AE ($v=9$). Данный контакт наблюдается, если две точки, принадлежащие звену, взаимодействуют с двумя точками, принадлежащими стороне AE препятствия. Причем можно выделить три варианта взаимодействия: 1) некоторые

точки звена – крайние точки стороны AE ; 2) некоторая точка звена и его крайняя точка – крайние точки стороны AE ; 3) некоторая точка звена и его крайняя точка – некоторая точка стороны AE и точка A . Первый режим взаимодействия показан на рис. 9а. Углы ориентации препятствия и звена робота в этом случае равны между собой.

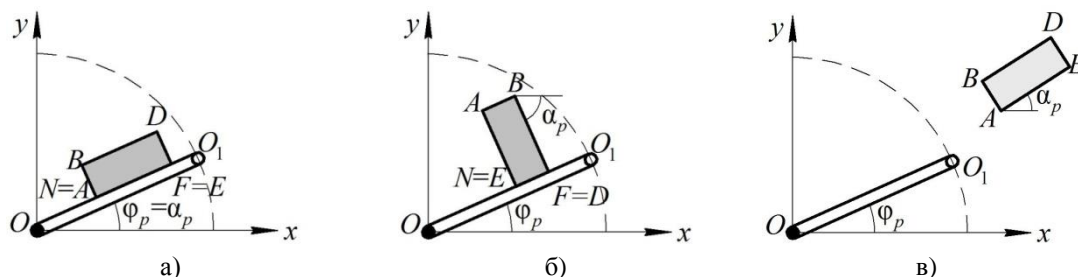


Рис. 9. Взаимодействие звена OO_1 со стороной препятствия: а – AE ($n=1$); б – ED ($n=2$); в – отсутствие взаимодействия робота и препятствия ($n=5$)

При таком контакте звена робота и препятствия всегда требуется корректировка движения ($n=1$):

$$n_{OO_1-AE} = 1, \text{ if } [(\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_A) \wedge (\mathbf{r}_F = \mathbf{r}_E)] \vee [(\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_A) \wedge (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_E)] \vee [(\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_A) \wedge (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_Q)] \wedge (\varphi_n \leq \alpha \leq \varphi_k) \wedge (\alpha_p = \varphi_p).$$

Другой режим контакта звена со стороной препятствия показан на рис. 9б. В этом случае в качестве контактной стороны препятствия выступает ED ($v=10$), режимы взаимодействия аналогичны рас-

смотренным для стороны препятствия AE . Такой режим контакта возможен только при условии, что сторона AE препятствия перпендикулярна звену. Условия контакта имеют вид

$$n_{OO_1-ED} = 2, \text{ if } [(\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_E) \wedge (\mathbf{r}_F = \mathbf{r}_D)] \vee [(\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_E) \wedge (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_D)] \vee [(\mathbf{r}_N = \mathbf{r}_E) \wedge (\mathbf{r}_{O_1} = \mathbf{r}_M)] \wedge ([\varphi_n - \pi/2] \leq \alpha \leq [\varphi_k - \pi/2]) \wedge (\alpha_p = [\varphi_p - \pi/2]).$$

Взаимодействие звена робота с препятствием отсутствует. Последний из возможных вариантов преодоления препятствия – бесконтактный – показан на

$$n = 5 \text{ if } (\mathbf{r}_A > \mathbf{r}_{O_1}) \wedge (\mathbf{r}_B > \mathbf{r}_{O_1}) \wedge (\mathbf{r}_E > \mathbf{r}_{O_1}) \wedge (-\pi/2 < \alpha \leq \pi/2).$$

Диапазон угла ориентации препятствия при этом не зависит от значений

рис. 9в. Такой способ возможен в том случае, если все точки препятствия располагаются за пределами дуги окружности, по которой перемещается звено робота:

начального и конечного углов поворота звена робота.

Диаграммы режимов контактного взаимодействия

Обобщим сформулированные выше условия рассмотренных режимов контакта звена робота с препятствием и запишем

условия выполнения того или иного режима преодоления препятствия.

Режимы контакта, требующие корректировки движения звена робота:

$$n = 1 \text{ if } [(\alpha \in (\varphi_n; \pi/2]) \wedge (\alpha_p > \varphi_p) \wedge (\mathbf{r}_{O_1-A} \vee \mathbf{r}_{O_1-K} \vee \mathbf{r}_{N-A})] \vee [(\alpha \in [0; \varphi_k)) \wedge (\alpha_p < \varphi_p) \wedge (\mathbf{r}_{O_1-E} \vee \mathbf{r}_{O_1-Q} \vee \mathbf{r}_{N-E})] \vee [(\alpha \in [\varphi_n; \varphi_k]) \wedge (\alpha_p = \varphi_p) \wedge [(\mathbf{r}_{N-A} \wedge \mathbf{r}_{F-E}) \vee (\mathbf{r}_{N-A} \wedge \mathbf{r}_{O_1-E}) \vee (\mathbf{r}_{N-A} \wedge \mathbf{r}_{O_1-Q})]],$$

$$n = 2 \text{ if } [(\alpha \in (\varphi_n - \pi/2; 0)) \wedge (\alpha_p > [\varphi_p - \pi/2]) \wedge (\mathbf{r}_{O1-E} \vee \mathbf{r}_{O1-Q} \vee \mathbf{r}_{N-E})] \vee$$

$$[(\alpha \in (-\pi/2; \varphi_k - \pi/2)) \wedge (\alpha_p > [\varphi_p - \pi/2]) \wedge \mathbf{r}_{O1-M}] \vee$$

$$[(\alpha \in [\varphi_n - \pi/2; \varphi_k - \pi/2]) \wedge (\alpha_p = [\varphi_p - \pi/2]) \wedge [(\mathbf{r}_{N-E} \wedge \mathbf{r}_{F-D}) \vee$$

$$(\mathbf{r}_{N-E} \wedge \mathbf{r}_{O1-D}) \vee (\mathbf{r}_{N-E} \wedge \mathbf{r}_{O1-M})].$$

Режимы контакта, позволяющие преодолеть препятствие без корректировки

движения звена робота (при касании точек звена и препятствия):

$$n = 3 \text{ if } [(\alpha \in [0; \varphi_k]) \wedge (\alpha_p \leq \varphi_p) \wedge \mathbf{r}_{O1-A}] \vee$$

$$[(\alpha \in [\varphi_n; \pi/2]) \wedge (\alpha_p \geq \varphi_p) \wedge \mathbf{r}_{O1-B}] \vee$$

$$[(\alpha \in [\varphi_n; \varphi_k]) \wedge (\alpha_p = \varphi_p) \wedge \mathbf{r}_{O1-K}],$$

$$n = 4 \text{ if } [(\alpha \in [\varphi_n - \pi/2; 0]) \wedge (\alpha_p \geq [\varphi_p - \pi/2]) \wedge \mathbf{r}_{O1-A}] \vee$$

$$[(\alpha \in (-\pi/2; \varphi_k - \pi/2]) \wedge (\alpha_p \leq [\varphi_p - \pi/2]) \wedge \mathbf{r}_{O1-E}] \vee$$

$$[(\alpha \in [\varphi_n - \pi/2; \varphi_k - \pi/2]) \wedge (\alpha_p = [\varphi_p - \pi/2]) \wedge \mathbf{r}_{O1-Q}].$$

Бесконтактный способ преодоления препятствия, не требующий корректировки движения звена:

$$n = 5 \text{ if } [(\alpha \in (-\pi/2; \pi/2]) \wedge \mathbf{r}_{A>O1} \wedge \mathbf{r}_{B>O1} \wedge \mathbf{r}_{E>O1}],$$

где \mathbf{r}_{O1-A} и аналогичные обозначения соответствуют записи $\mathbf{r}_{O1} = \mathbf{r}_A$, а $\mathbf{r}_{A>O1}$ и аналогичные означают $\mathbf{r}_A > \mathbf{r}_{O1}$.

нов угла α ориентации препятствия, а на рис. 11 приведены диаграммы, иллюстрирующие соотношение между углами α_p и φ_p . Цифры 1-10 на диаграммах соответствуют режиму контакта $v=1-10$.

На рис. 10 построены поясняющие записанные выше режимы преодоления препятствий ($n=1-4$) диаграммы диапазо-

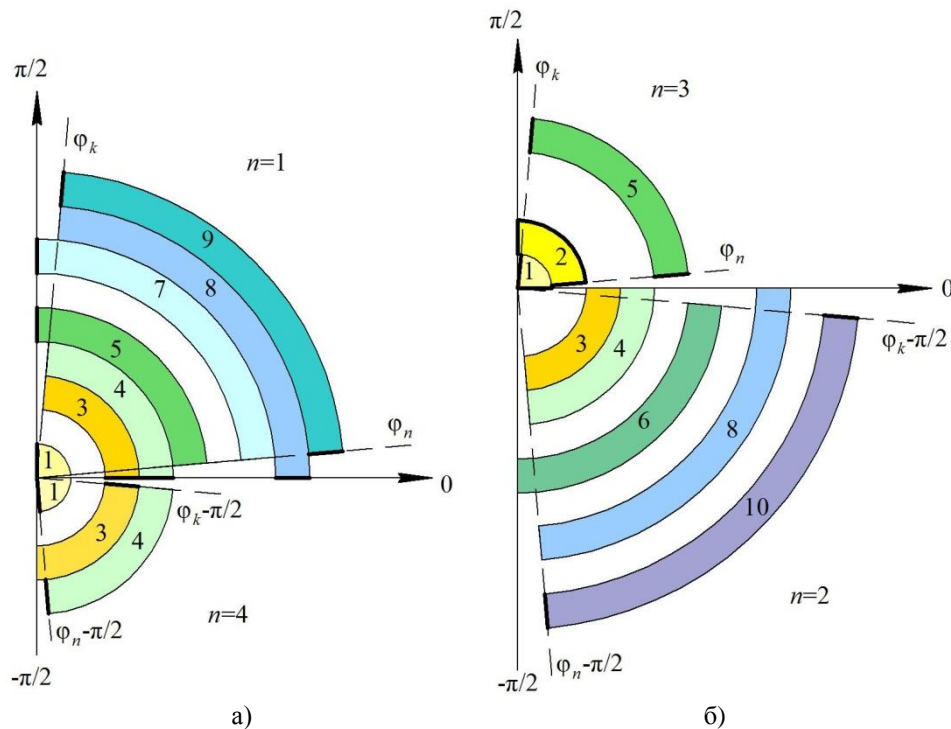
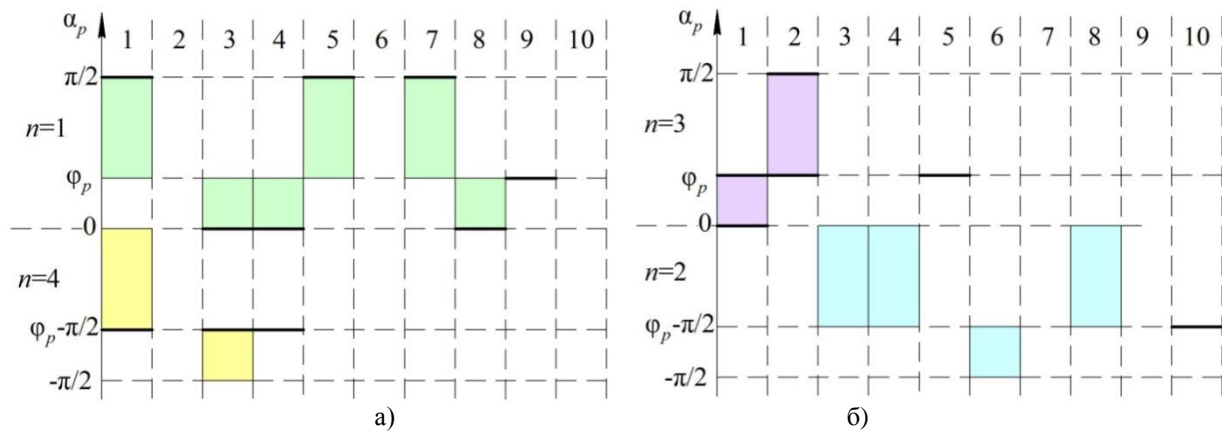


Рис. 10. Диаграммы диапазонов угла α при $v=1-10$: а - $n=1, 4$; б - $n=2, 3$

Рис. 11. Диаграммы диапазонов угла α_p при $v=1-10$: а – $n=1, 4$; б – $n=2, 3$

Заключение

Итак, рассмотрено движение звена ползающего робота по горизонтальной поверхности с расположенными на ней препятствиями (каждое препятствие представлено в форме прямоугольника). Разработана классификация возможных режимов контакта звена робота с препятствием при условии, что взаимодействие может осуществляться как крайними точками звена и препятствия, так и некоторыми точками, принадлежащими звену и сторонам препятствия, а также непосредственно звеном и стороной препятствия. На осно-

вании предложенной классификации сформирован набор правил работы системы определения режима взаимодействия звена робота с препятствием, позволяющий установить, возможно ли преодоление препятствия без корректировки движения звена или нет. Построены диаграммы диапазонов угла ориентации препятствия на плоскости, а также диаграммы, иллюстрирующие соотношения между диапазонами углов ориентации препятствия и звена робота, при которых будет возникать тот или иной режим контакта.

Работа выполнена в рамках гранта Президента МК-200.2019.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Liljebäck, P. A review on modelling, implementation and control of snake robots / P. Liljebäck, K.Y. Pettersen, Q. Stavdahl, J.T. Gravdahl // Robotics and Autonomous systems. - 2012. - Vol. 60. - № 1. - P. 29-40.
- Hu, D. The mechanics of slithering locomotion / D. Hu, J. Nirody, T. Scott, M. Shelley // Proc. National Academy of Sciences, USA. - 2009. - Vol. 106. - P. 10081-10085.
- Ishikawa, M. Iterative feedback control of snake-like robot based on principal fiber bundle modeling / M. Ishikawa // Int. J. Advanced Mechatronic Systems. - 2009. - Vol. 1. - № 3. - P. 175-182.
- Matsuno, F. Trajectory tracking control of snake robots based on dynamic model / F. Matsuno, H. Sato // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. - 2005. - P. 3029-3034.
- Saito, M. Serpentine locomotion with robotic snakes / M. Saito, M. Fukaya, T. Iwasaki // IEEE Contr. Syst. Mag. - 2002. - Vol. 22. - № 1. - P. 64-81.
- Li, J. Passivity control of underactuated snake-like robots / J. Li, J. Shan // Proc. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. - 2008. - P. 485-490.
- Liljebäck, P. Hybrid modelling and control of obstacle-aided snake robot locomotion / P. Liljebäck, K.Y. Pettersen, Q. Stavdahl, J.T. Gravdahl // IEEE Trans. Robotics. - 2010. - Vol. 26. - № 5. - P. 781-799.
- Transth, A.A. Snake robot obstacle aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments / A.A. Transth, R.I. Leine, C. Glocker, K.Y. Pettersen, P. Liljebäck // IEEE Trans. Rob. - 2008. - Vol. 24. - № 1. - P. 88-104.
- Vorocheva, L.Yu. Simulation of Motion of a Three-Link Robot with Controlled Friction Forces on a Horizontal Rough Surface / L.Yu. Vorocheva, G.S. Naumov, S.F. Yatsun // J. of Computer and Systems Sciences International. - 2015. - Vol. 54. - № 1. - P. 151-164.
- Vorocheva, L.Yu. Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces / L.Yu. Vorocheva, G.Ya. Panovko, S.I. Savin, A.S. Yatsun // J. of Machinery Manufacture and Reliability. - 2017. - Vol. 46. - № 6. - P. 527-535.

1. Liljebäck, P. A review on modelling, implementation and control of snake robots / P. Liljebäck, K.Y. Pettersen, Q. Stavdahl, J.T. Gravdahl // Robotics and Autonomous systems. - 2012. - Vol. 60. - № 1. - P. 29-40.
2. Hu, D. The mechanics of slithering locomotion / D. Hu, J. Nirody, T. Scott, M. Shelley // Proc. National Academy of Sciences, USA. - 2009. - Vol. 106. - P. 10081-10085.
3. Ishikawa, M. Iterative feedback control of snake-like robot based on principal fiber bundle modeling / M. Ishikawa // Int. J. Advanced Mechatronic Systems. - 2009. - Vol. 1. - № 3. - P. 175-182.
4. Matsuno, F. Trajectory tracking control of snake robots based on dynamic model / F. Matsuno, H. Sato // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. - 2005. - P. 3029-3034.
5. Saito, M. Serpentine locomotion with robotic snakes / M. Saito, M. Fukaya, T. Iwasaki // IEEE Contr. Syst. Mag. - 2002. - Vol. 22. - № 1. - P. 64-81.
6. Li, J. Passivity control of underactuated snake-like robots / J. Li, J. Shan // Proc. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. - 2008. - P. 485-490.
7. Liljebäck, P. Hybrid modelling and control of obstacle-aided snake robot locomotion / P. Liljebäck, K.Y. Pettersen, Q. Stavdahl, J.T. Gravdahl // IEEE Trans. Robotics. - 2010. - Vol. 26. - № 5. - P. 781-799.
8. Transeth, A.A. Snake robot obstacle aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments / A.A. Transeth, R.I. Leine, C. Glocker, K.Y. Pettersen, P. Liljebäck // IEEE Trans. Rob. - 2008. - Vol. 24. - № 1. - P. 88-104.
9. Vorochaeva, L.Yu. Simulation of Motion of a Three-Link Robot with Controlled Friction Forces on a Horizontal Rough Surface / L.Yu. Vorochaeva, G.S. Naumov, S.F. Yatsun // J. of Computer and Systems Sciences International. - 2015. - Vol. 54. - № 1. - P. 151-164.
10. Vorochaeva, L.Yu. Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces / L.Yu. Vorochaeva, G.Ya. Panovko, S.I. Savin, A.S. Yatsun // J. of Machinery Manufacture and Reliability. - 2017. - Vol. 46. - № 6. - P. 527-535.

Ссылка для цитирования:

Ворочаева, Л.Ю. Разработка системы определения режима контактного взаимодействия звена ползающего робота с препятствием / Л.Ю. Ворочаева, С.И. Савин, А.С. Яцун // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 8. – С.11 - 21.

Статья поступила в редакцию 11.06.19

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета,
главный редактор журнала «Вестник БГТУ»

Киричек А.В.

Статья принята к публикации 26. 06. 19.

Сведения об авторах:

Ворочаева Людмила Юрьевна, к.т.н., доцент Юго-Западного государственного университета, e-mail: mila180888@yandex.ru.

Савин Сергей Игоревич, к.т.н., ст.научный сотрудник Университета Иннополис, e-mail: s.savin@innopolis.ru.

Vorochaeva Lyudmila Yurievna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., South-Western State University, e-mail: mila180888@yandex.ru.

Savin Sergey Igorevich, Can. Sc. Tech., Senior Research Assistant, University of Innopolis, e-mail: s.savin@innopolis.ru.

Яцун Андрей Сергеевич, к.т.н., зав. лабораторией мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета, e-mail: ayatsun@yandex.ru.

Yatsun Andrey Sergeevich, Can. Sc. Tech., Head of the Lab. “Mechatronics and Robotics”, South-Western State University, e-mail: ayatsun@yandex.ru.