

УДК 621.865

**С.Ф. Яцун**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: teormeh@inbox.ru)

**Л.Ю. Ворочаева**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: mila180888@yandex.ru)

**А.В. Мальчиков**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: zveroknnp@gmail.com)

**А.С. Яцун**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ayatsun@yandex.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТРЕХЗВЕННОГО ПОЛЗАЮЩЕГО РОБОТА ПО НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Бионические принципы движения являются наиболее перспективными для задач перемещения и транспортировки оборудования в наиболее тяжелых условиях. Походки, основанные на изменяемой форме робота, при которых взаимодействие с поверхностью осуществляется посредством частей корпуса, могут найти применение при движении по пересеченной местности, в ограниченном пространстве технологических и природных полостей, там, где использование колесно-гусеничного или шагающего принципа невозможно. В данной работе предлагается конструкция трехзвеного ползающего робота, оснащенного двухкоординатными шарнирами. Робот оснащен группой опорных элементов, в том числе с регулируемыми коэффициентами трения, что позволяет реализовать различные типы алгоритмов движения устройства.*

*В статье представлена математическая модель трехзвеного робота, позволяющая исследовать процесс движения робота в случае, когда коэффициенты трения поверхности под опорами не равны между собой. На практике поверхность чаще всего будет иметь неоднородную недетерминированную структуру, что будет приводить к отклонению курса при прямолинейном движении, обусловленному проскальзыванием или, наоборот, стопорением опор на поверхности. В работе предлагается алгоритм и схема системы автоматического управления, позволяющая роботу двигаться по заданной траектории несмотря на недетерминированность поверхности. Это достигается посредством использования дополнительных датчиков: цифрового электронного компаса, акселерометра, GPS-модуля.*

*В работе приведены как результаты вычислительных экспериментов, так и результаты, полученные в ходе натурных испытаний движения действующего прототипа трехзвеного робота. В завершении статьи приведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических результатов, подтвердивших адекватность разработанной математической модели и вычислительных алгоритмов.*

**Ключевые слова:** ползающий робот; математическое моделирование; недетерминированная поверхность; система управления.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-4-6-14

**Ссылка для цитирования:** Исследование движения трехзвеного ползающего робота по недетерминированной поверхности / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Ворочаева, А.В. Мальчиков, А.С. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 4(79). С. 6-14.

\*\*\*

### Введение

На сегодняшний день изучению роботов, в основе движения которых лежат изменяемая форма корпуса и регулируемая сила трения, уделяется большое внимание [1-6]. Различные конструктивные

формы устройств позволяют добиваться уникальных параметров движения: высокой проходимости, энергоэффективности, дискретности шага [4-11]. Однако большое влияние на параметры движения оказывает однородность поверхности, по-

стоянство коэффициента трения между опорами робота и поверхностью. Как показывают экспериментальные исследования прототипа трехзвенного робота, рассматриваемого в работе, неравенство коэффициентов трения, обусловленное неоднородностью поверхности, приводит к изменению направления движения. Так как реальная поверхность практически всегда неоднородна, то актуальной является задача обеспечения прямолинейного движения робота или движения по определенной траектории. Данную задачу предлагается решать введением дополнительных датчиков и определенных алго-

ритмов системы управления ползающего робота.

### Описание конструкции трехзвенного ползающего робота

На рис. 1, а показана конструктивная схема трехзвенного ползающего робота, оснащенного системой локальной навигации. Робот состоит из следующих основных элементов: центральное звено 1, оснащенное регулируемой опорой 4, активированной сервоприводом 6; боковые звенья 2 с нерегулируемыми опорами 5; центральный вычислительный модуль 7 и элементы питания 8.

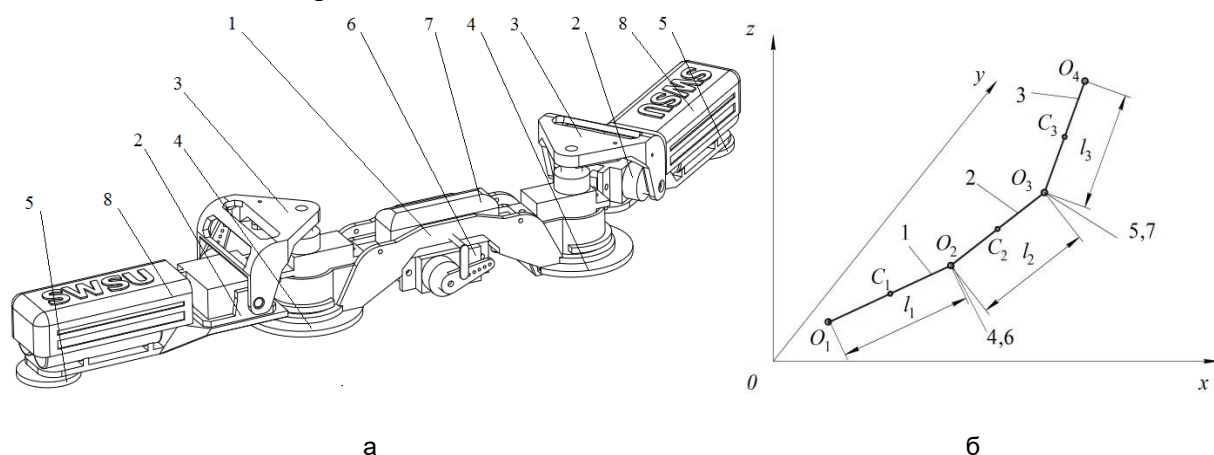


Рис. 1: а – конструктивная схема робота, б – расчетная схема робота

Особенностью данной конструкции является наличие активированных двухкоординатных шарниров 3, позволяющих перемещаться звеньям не только в горизонтальной плоскости, но и осуществлять подъем и опускание. За счет этой конструктивной особенности становится возможным преодоление препятствий и движение по неровной поверхности. Центральное звено робота оснащено регулируемым опорным элементом, позволяющим изменять тип поверхности центральной опоры, взаимодействующей с поверхностью [4-11].

### Описание движения ползающего робота

Для разработки математической модели робота перейдем к расчетной схеме, показанной на рис. 1, б. Будем считать, что каждое звено робота  $i=1-3$  является абсолютно твердым стержнем  $O_iO_{i+1}$  длиной  $l_i$  и массой  $m_i$ , центр масс которого совпадает с центром симметрии  $C_i$ . В шарнирах  $O_2$  и  $O_3$  установлены приводы, обеспечивающие повороты звеньев в горизонтальной (приводы 4 и 5) и вертикальных (приводы 6 и 7) плоскостях. В крайних точках звеньев расположены

контактные элементы, причем коэффициент трения опор  $O_2$  и  $O_3$  является управляемым, что будет рассмотрено ниже.

Движение устройства происходит в неподвижной абсолютной системе координат  $Oxyz$ . Для описания кинематики и динамики объекта с точками  $O_i$ ,  $i = 1-3$ , звеньев связаны относительные системы координат  $O_i x_i y_i z_i$ , повернутые на углы  $\varphi_i$  относительно оси  $Ox$  в плоскости  $Oxy$ , и  $O_i' x_i' y_i' z_i'$ , повернутые на углы  $\theta_i$  относительно осей  $O_i x_i$  в плоскостях  $O_i x_i z_i$ . Положительные направления углов отсчитываются против часовой стрелки от осей  $Ox$  и  $O_i x_i$  соответственно. Будем считать, что движение робота происходит по горизонтальной шерохо-

ватой поверхности. Взаимодействие робота с поверхностью описывается моделью, приведенной в работе [4].

Обобщенными координатами являются проекции положения центра масс звена 1 на оси абсолютной системы координат, а также углы  $\varphi_i$ ,  $\theta_i$  поворота звеньев:

$$\mathbf{q} = (x_{c1} \ y_{c1} \ z_{c1} \ \varphi_1 \ \theta_1 \ \varphi_2 \ \theta_2 \ \varphi_3 \ \theta_3)^T.$$

В работе предлагается один из вариантов движения робота, при котором можно выделить четыре этапа, на каждом из них поведение объекта описывается своими дифференциальными уравнениями с учетом накладываемых связей (рис. 2, рис. 3). Движение центрального звена происходит на первом этапе, а боковых – на втором, третьем и четвертом этапах.

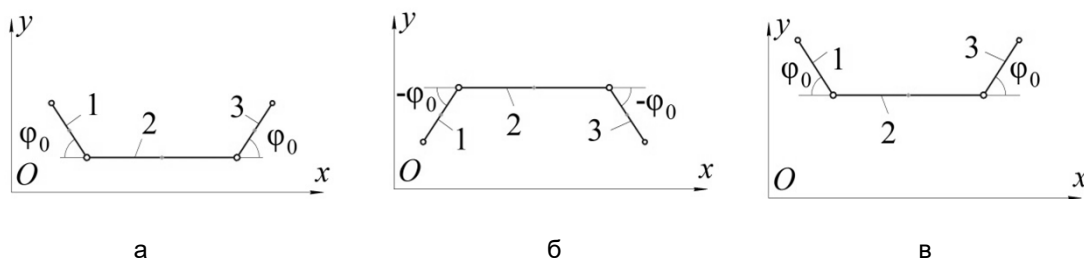


Рис. 2. Положения робота в горизонтальной плоскости: а – начало первого этапа, б – конец первого этапа, начало третьего этапа, в – конец третьего этапа

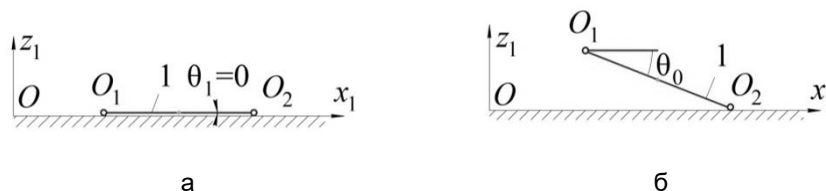


Рис. 3. Положения звена 1 в вертикальной плоскости: а – начало второго этапа, б – конец второго этапа, начало четвертого этапа

Пусть движение происходит из начального положения, при котором все звенья робота неподвижны и контакти-

руют с поверхностью,  $\theta_{21} = -\theta_{23} = 0$ , звенья 1 и 3 расположены относительно звена 2 в горизонтальной плоскости под

равными по модулю и противоположными по направлению углами  $\varphi_{21} = -\varphi_{23} = \varphi_0$ . Контакт центрального звена с поверхностью осуществляется опорами с малым коэффициентом трения  $f_{2,3} = f_{\min}$ .

На первом этапе движение происходит в горизонтальной плоскости, т.е. на систему наложены связи:  $z_{C1} = 0$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$ . Под действием моментов, генерируемых приводами 4 и 5, все звенья робота движутся до тех пор, пока не будет справедливо условие:  $\varphi_{21} = -\varphi_{23} = -\varphi_0$ . После этого происходит смена опорных элементов центрального звена и на всех последующих этапах движения  $f_{2,3} = f_{\max}$ .

Второй этап характеризуется поворотом звеньев 1 и 3 под действием моментов, создаваемых приводами 6 и 7, в вертикальных плоскостях относительно осей  $Oix_i$  на углы  $\theta_{21} = -\theta_{23} = \theta_0$ , где  $\theta_0$  – некоторое заданное значение. Звено 2 во время этого этапа зафиксировано на поверхности. На систему наложены связи:  $x_{C2} = \text{const}$ ,  $y_{C2} = \text{const}$ ,  $z_{C2} = 0$ ,  $\varphi_2 = \text{const}$ ,  $\theta_2 = 0$ ,  $\varphi_{21} = -\varphi_{23} = -\varphi_0$ .

Во время третьего этапа звено 2 неподвижно лежит на поверхности, а звенья 1 и 3 поворачиваются за счет моментов приводов 4 и 5 до выполнения условия  $\varphi_{21} = -\varphi_{23} = \varphi_0$ . Движение робота ограничено связями:  $x_{C2} = \text{const}$ ,  $y_{C2} = \text{const}$ ,  $z_{C2} = 0$ ,  $\varphi_2 = \text{const}$ ,  $\theta_2 = 0$ ,  $\theta_{21} = -\theta_{23} = \theta_0$ .

Четвертый этап происходит при неподвижно расположенном на поверхности звене 2 и заключается в повороте звеньев 1 и 3 относительно звена 2 в вертикальных плоскостях посредством моментов приводов 6 и 7 до тех пор, пока не будет выполняться условие  $\theta_{21} = -\theta_{23} = 0$ . При этом связи, накладываемые на робота, следующие:  $x_{C2} = \text{const}$ ,  $y_{C2} = \text{const}$ ,  $z_{C2} = 0$ ,  $\varphi_2 = \text{const}$ ,  $\theta_2 = 0$ ,  $\varphi_{21} = -\varphi_{23} = \varphi_0$ .

На основании вышесказанного вектор обобщенных координат робота можно представить следующим образом:

$$\mathbf{q} = \begin{cases} (x_{C1}, y_{C1}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T, & p = 1, \\ (\theta_1, \theta_3)^T, & p = 2, 4, \\ (\varphi_1, \varphi_3)^T, & p = 3, \end{cases}$$

где  $p$  – номер этапа.

Дифференциальные уравнения движения будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 &= \begin{cases} p = 1: [F_{\varphi_1}^{(1)} - a_{\varphi_1\varphi_2}^{(1)}\ddot{\varphi}_2 - a_{\varphi_1\varphi_3}^{(1)}\ddot{\varphi}_3 - a_{\varphi_1x_{C1}}^{(1)}\ddot{x}_{C1} - a_{\varphi_1y_{C1}}^{(1)}\ddot{y}_{C1} - b_{\varphi_1\varphi_2}^{(1)}\dot{\varphi}_2^2 - a_{\varphi_1\varphi_3}^{(1)}\dot{\varphi}_3^2] / k_{\varphi_1}^{(1)}, \\ p = 3: F_{\varphi_1}^{(3)} / k_{\varphi_1}^{(3)}, \end{cases} \\ \ddot{\varphi}_2 &= [F_{\varphi_2}^{(1)} - a_{\varphi_2\varphi_1}^{(1)}\ddot{\varphi}_1 - a_{\varphi_2\varphi_3}^{(1)}\ddot{\varphi}_3 - a_{\varphi_2x_{C1}}^{(1)}\ddot{x}_{C1} - a_{\varphi_2y_{C1}}^{(1)}\ddot{y}_{C1} - b_{\varphi_2\varphi_1}^{(1)}\dot{\varphi}_1^2 - b_{\varphi_2\varphi_3}^{(1)}\dot{\varphi}_3^2] / k_{\varphi_2}^{(1)}, \\ \ddot{\varphi}_3 &= \begin{cases} p = 1: [F_{\varphi_3}^{(1)} - a_{\varphi_3\varphi_1}^{(1)}\ddot{\varphi}_1 - a_{\varphi_3\varphi_2}^{(1)}\ddot{\varphi}_2 - a_{\varphi_3x_{C1}}^{(1)}\ddot{x}_{C1} - a_{\varphi_3y_{C1}}^{(1)}\ddot{y}_{C1} - b_{\varphi_3\varphi_1}^{(1)}\dot{\varphi}_1^2 - b_{\varphi_3\varphi_2}^{(1)}\dot{\varphi}_2^2] / k_{\varphi_3}^{(1)}, \\ p = 3: F_{\varphi_3}^{(3)} / k_{\varphi_3}^{(3)}, \end{cases} \\ \ddot{x}_{C1} &= [F_{x_{C1}}^{(1)} - a_{x_{C1}\varphi_1}^{(1)}\ddot{\varphi}_1 - a_{x_{C1}\varphi_2}^{(1)}\ddot{\varphi}_2 - a_{x_{C1}\varphi_3}^{(1)}\ddot{\varphi}_3 - b_{x_{C1}\varphi_1}^{(1)}\dot{\varphi}_1^2 - b_{x_{C1}\varphi_2}^{(1)}\dot{\varphi}_2^2 - b_{x_{C1}\varphi_3}^{(1)}\dot{\varphi}_3^2] / k_{x_{C1}}^{(1)}, \\ \ddot{y}_{C1} &= [F_{y_{C1}}^{(1)} - a_{y_{C1}\varphi_1}^{(1)}\ddot{\varphi}_1 - a_{y_{C1}\varphi_2}^{(1)}\ddot{\varphi}_2 - a_{y_{C1}\varphi_3}^{(1)}\ddot{\varphi}_3 - b_{y_{C1}\varphi_1}^{(1)}\dot{\varphi}_1^2 - b_{y_{C1}\varphi_2}^{(1)}\dot{\varphi}_2^2 - b_{y_{C1}\varphi_3}^{(1)}\dot{\varphi}_3^2] / k_{y_{C1}}^{(1)}, \\ \ddot{\theta}_1 &= \begin{cases} p = 2: F_{\theta_1}^{(2)} / k_{\theta_1}^{(2)}, \\ p = 4: F_{\theta_1}^{(4)} / k_{\theta_1}^{(4)}, \end{cases} & \ddot{\theta}_3 = \begin{cases} p = 2: F_{\theta_3}^{(2)} / k_{\theta_3}^{(2)}, \\ p = 4: F_{\theta_3}^{(4)} / k_{\theta_3}^{(4)}. \end{cases} \end{aligned}$$

В формулах приняты следующие обозначения:  $F$  – обобщенная сила по координате  $q$ ;  $a$  – коэффициенты при обобщенных ускорениях;  $b$  – коэффициенты при квадратах обобщенных скоростей;  $k$  – коэффициенты при обобщенных ускорениях, для которых записываются дифференциальные уравнения, верхний индекс соответствует номеру этапа движения.

### Результаты численного моделирования

На основании разработанной математической модели было проведено численное моделирование движения полза-

ющего робота, при котором коэффициенты трения в точках  $O_2$ ,  $O_3$  и  $O_4$  отличаются от коэффициента в точке  $O_1$ . При исследовании был задан алгоритм прямолинейного движения и построены графики абсолютного угла поворота центрального звена. Результаты моделирования представлены на рис. 4. Как показали результаты моделирования, при увеличении разницы коэффициентов трения между опорами угол поворота корпуса робота относительно прямолинейной траектории возрастает.

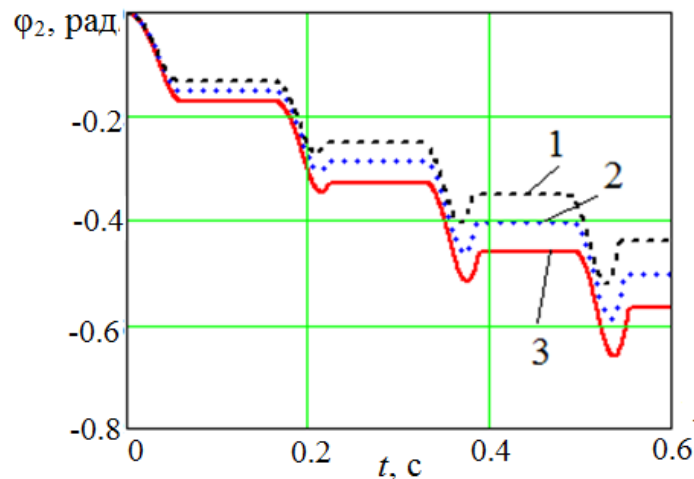


Рис. 4. Графики теоретических зависимостей  $\varphi_2(t)$  при  $f_{1-3} = 0.4$ : 1 –  $f_4 = 0.45$ , 2 –  $f_4 = 0.50$ , 3 –  $f_4 = 0.55$

Так при разнице коэффициентов в 20% за 4 шага робот разворачивается на  $25^\circ$ , при разнице в 30% – на  $35^\circ$ .

### Экспериментальные исследования движения по неоднородной поверхности

Для определения точности разработанной математической модели был поставлен ряд экспериментов, в которых прототип 1 робота, изображенный на рис. 5, а, должен перемещаться по неоднородной поверхности. В качестве примера по-

верхностей были выбрана тканевая поверхность 2 ( $f=0.67$ ) и бумажная 3 ( $f=0.52$ ). Коэффициенты трения определялись экспериментально методом наклонной плоскости.

Суть эксперимента заключалась в следующем. Робот выполнял алгоритм прямолинейного движения, при этом три опоры из четырех перемещались по тканевой поверхности, а одна боковая – по бумажной поверхности, имеющей более низкий коэффициент трения.

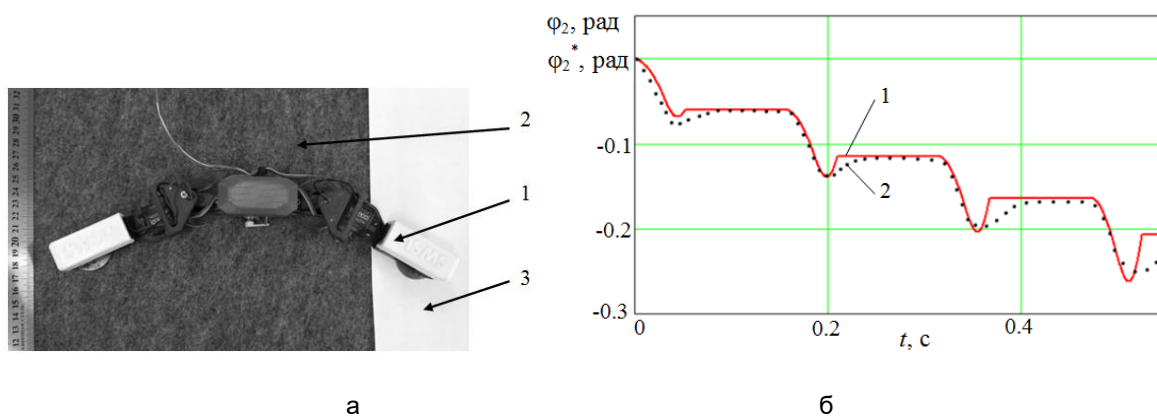


Рис. 5. а – фото прототипа ползающего робота; б – графики зависимостей угла поворота центрального звена: 1 –  $\varphi_2(t)$  численное моделирование, 2 –  $\varphi_2^*(t)$  натурные испытания

В процессе движения фиксировались положения точек робота с помощью видеооборудования. Далее покадровая обработка данных позволила получить траектории точек устройства.

Для сопоставления натурных и численных экспериментов был получен совмещенный график абсолютного угла поворота центрального звена, показанный на рис. 5, б. По этому графику видно, что характер изменения угла поворота одинаков в обоих случаях, однако наблюдаются расхождения в фазе возвратного движения звеньев, что может быть обусловлено наличием незначительных колебаний робота в вертикальной плоскости, не учитываемых в модели. Однако данный эффект не меняет картину движения, а значит, разработанная математическая

модель вполне корректно описывает процесс движения робота по недетерминированной неоднородной поверхности и может быть использована для дальнейших исследований.

#### Описание системы автоматического управления

Как показали результаты математического моделирования и натурных испытаний, при перемещении по неоднородной поверхности наблюдается разворот корпуса робота и отклонение от прямолинейного курса следования. Для компенсации данного эффекта предлагается использовать систему локальной навигации, включающей магнитометр (электронный компас) и GPS-модуль. Структурная схема показана на рисунке 6.

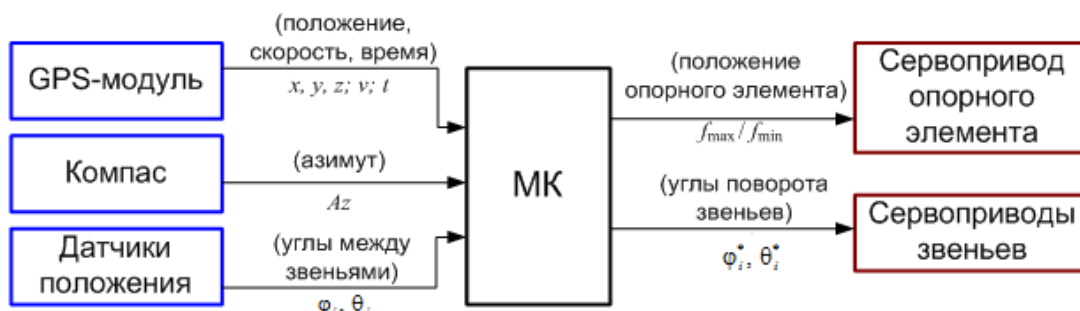


Рис. 6. Структурная схема системы управления ползающего робота

Система управления работает следующим образом. Если отклонения от курса  $\Delta Az = (Az^* - Az)$  меньше, чем заданное значение ошибки курса  $\varepsilon_{Az}$ , то углы формируются согласно алгоритму прямолинейного движения, реализованного программой микроконтроллера. Если отклонение курса превышает величину ошибки  $(Az^* - Az) > \left| \varepsilon_{Az} \right|$ , то углы поворота звеньев формируются согласно алгоритму поворота робота, при этом учитывается знак ошибки для определения направления поворота.

Электронный компас является достаточно точным инструментом для измерения ошибки направления движения, однако дополнительно для отслеживания курса могут использоваться данные с GPS-модуля ( $x, y, z$ ), но из-за невысокой точности GPS-модуля (порядка 20 м) использовать данные с GPS можно только при перемещении робота на большие расстояния. Датчики углов  $\varphi_{21}, \varphi_{23}, \theta_{21}, \theta_{23}$  между звеньями используются в составе сервоприводов для точной отработки требуемых углов поворота и подъема звеньев.

Предполагается, что введение дополнительных датчиков и настройка соответствующим образом алгоритмов системы автоматического управления позволит бороться с отклонениями курса и осуществлять движения по заданным траекториям.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрена конструкция трехзвенного ползающего робота, оснащенного двухкоординатными шарнирами, предложена математическая модель, позволяющая моделировать процессы движения робота по неодно-

родной поверхности. Для проверки адекватности полученной математической модели были поставлены эксперименты с прототипом ползающего робота. Сравнительный анализ результатов натуральных и численных экспериментов показал схожий характер изменения контролируемых величин. По временной зависимости угла поворота центрального звена в случае, если одна из опор скользит по поверхности с отличными свойствами, видно, что происходит разворот робота в направлении меньшего коэффициента трения. Для компенсации эффекта отклонения от курса было предложено оснастить робота дополнительными датчиками, а именно цифровым компасом для обеспечения точности движения по заданной траектории даже при развороте из-за неоднородности поверхности под опорами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-51-12025).*

### Список литературы

1. Li G., Zhang H., Zhang J., Bye R. T. Development of Adaptive Locomotion of a Caterpillar-Like Robot Based on a Sensory Feedback CPG Model // *Advanced Robotics*. 2014. V. 28. № 6. P. 389-401.
2. Matsuo T., Ishii K. Adaptative Motion Control System of a Snake-Like Robot Using a Neural Oscillator Network // *2014 Joint 7th Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th Int. Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, Kitakyushu, Japan. 2014.
3. Conkur E. S., Gurbuz R. Path Planning Algorithm For Snake-Like Robots // *Information Technology And Control*. 2008. Vol. 37. № 2. P. 159-162.
4. Ворочаева Л.Ю., Наумов Г.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения трехзвенного робота с управляемыми силами трения по горизонтальной шерохо-

вато́й поверхности // Изв. РАН. ТИСУ. 2015. № 1. С. 156-170.

5. Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями // Изв. РАН. ТИСУ. 2017. № 3. С. 191-216.

6. Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Жакин А.И. Динамические опорные элементы ползающих роботов для движения по наклонным поверхностям // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №2 (41). С.89-95.

7. Jatsun S.F., Volkova L.Yu., Naumov G.S., Yatsun A.S. Modelling of movement of the three-link robot with operated friction forces on the horizontal surface // 16th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Sydney, Australia, 2013. P. 677-684.

8. Jatsun S., Vorochaeva L., Yatsun A., Savin S., Malchikov A. Bio-inspired adaptive control strategy for a snake-like robot // 19th

Intern. Conf. on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Cheile Gradistei - Fundata. Romania, 2015. P. 273-278.

9. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Savin S.I. Study of Caterpillar-like Motion of a Four-link Robot // 14th IFToMM World Congress. Taipei, Taiwan. 2015. P. 1-6.

10. Jatsun S., Vorochaeva L., Yatsun A., Malchikov A. Theoretical and Experimental Studies of Transverse Dimensional Gait of Five-Link Mobile Robot on Rough Surface // 10th Intern. Symposium on Mechatronics and its Applications ISMA, Sharjah, UAE, 2015. P. 1-6.

11. Jatsun S.F., Loktionova O.G., Vorochaeva L.Yu. Modeling of the operated movement to a caterpillar of the similar robot on a horizontal surface // Intern. J. of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8 (3). P. 15231-15239.

*Поступила в редакцию 11.05.18*

---

UDC 621.865

**S.F. Jatsun**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: teormeh@inbox.ru)

**L.Yu. Vorochaeva**, Candidate of Engineering Sciences Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: mila180888@yandex.ru)

**A.V. Malchikov**, Candidate of Engineering Sciences Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: zveroknp@gmail.com)

**A.S. Yatsun**, Candidate of Engineering Sciences Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ayatsun@yandex.ru)

## **INVESTIGATION OF THE THREE-LINK CRAWLING ROBOTS MOVEMENT ON THE NONDETERMINATED SURFACE**

*Bionic principles of locomotion are the most promising for displacement and transporting equipment under the most difficult conditions. Robots gait based on the changing shape of the robots body and interaction with the surface by body parts, can find application when moving over rough terrain, in a closed space of technological and natural cavities, where the use of wheel-track or walking principle is not possible.*

*In this paper, we propose the design of a three-link crawling robot equipped with two-coordinate active joints. The robot is equipped by supporting elements. Some supporting elements has adjustable friction coefficients, which allows realize various types of movement algorithms of the device. The article presents a mathematical model of a three-link crawling robot, which allows to study the process of robot movement, including case when the coefficients of friction of the surface under the supports are not equal to each other. In practice, the surface will most often have an inhomogeneous nondeterministic structure, which will lead to a deviation in straight-line motion.*



The paper proposes an algorithm and a diagram of an automatic control system that allows robot to move along a given path despite the indeterminate surface. This is achieved by using additional sensors: a digital electronic compass, an accelerometer, a GPS module. The paper presents the results of computational experiments and the results obtained during the full-scale tests of the prototype of a three-link robot motion. At the end of the article, a comparative analysis of the experimental and theoretical results confirming the adequacy of the developed mathematical model and computational algorithms is presented.

**Key words:** crawling robot; mathematical modeling; non-deterministic surface; control system.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-4-6-14

**For citation:** Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V., Yatsun A.S. Investigation of the Three-Link Crawling Robots Movement on the Nondetermined Surface. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 6-14 (in Russ.).

\*\*\*

## Reference

1. Li G., Zhang H., Zhang J., Bye R. T. Development of Adaptive Locomotion of a Caterpillar-Like Robot Based on a Sensory Feedback CPG Model. *Advanced Robotics*. 2014, vol. 28, no. 6, pp. 389-401.
2. Matsuo T., Ishii K. Adaptative Motion Control System of a Snake-Like Robot Using a Neural Oscillator Network. 2014 Joint 7th Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th Int. Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), Kitakyushu, Japan, 2014.
3. Conkur E. S., Gurbuz R. Path Planning Algorithm For Snake-Like Robots. *Information Technology And Control*, 2008, vol. 37, no. 2, pp. 159-162.
4. Vorochaeva L.Ju., Naumov G.S., Jacun S.F. Modelirovanie dvizhenija trehzvennogo robota s upravljaemyimi silami trenija po gorizonta'noj sherohovatoj poverhnosti. *Izv. RAN. TiSU*, 2015, no. 1, pp. 156-170.
5. Vorochaeva L.Ju., Jacun A.S., Jacun S.F. Modelirovanie dvizhenija pjatizvennogo polzajushhego robota s upravljaemym treniem po poverhnosti s prepjatstvijami. *Izv. RAN. TiSU*. 2017, no. 3, pp. 191-216.
6. Jacun S.F., Mal'chikov A.V., Zhakin A.I. Dinamicheskie opornye jelementy polzajushhih robotov dlja dvizhenija po naklonnym poverhnostjam. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no.2 (41), pp. 89-95.
7. Jatsun S.F., Volkova L.Yu., Naumov G.S., Yatsun A.S. Modelling of movement of the three-link robot with operated friction forces on the horizontal surface. 16th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Sydney, Australia, 2013, pp. 677-684.
8. Jatsun S., Vorochaeva L., Yatsun A., Savin S., Malchikov A. Bio-inspired adaptive control strategy for a snake-like robot. 19th Intern. Conf. on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Cheile Gradistei - Fundata, Romania, 2015, pp. 273-278.
9. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Savin S.I. Study of Caterpillar-like Motion of a Four-link Robot. 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, 2015, pp. 1-6.
10. Jatsun S., Vorochaeva L., Yatsun A., Malchikov A. Theoretical and Experimental Studies of Transverse Dimensional Gait of Five-Link Mobile Robot on Rough Surface. 10th Intern. Symposium on Mechatronics and its Applications ISMA, Sharjah, UAE, 2015, pp. 1-6.
11. Jatsun S.F., Loktionova O.G., Vorochaeva L.Yu. Modeling of the operated movement to a caterpillar of the similar robot on a horizontal surface. *Intern. J. of Pharmacy & Technology*, 2016, vol. 8 (3), pp. 15231-15239.