

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛИНАМИ ЗВЕНЬЕВ ПОЛЗАЮЩЕГО РОБОТА¹

Ворочаева Л. Ю.²

(Юго-Западный государственный университет, Курск)

Савин С. И.³

(Университет Иннополис, Иннополис)

Работа посвящена разработке системы управления движением ползающего робота при его перемещении по горизонтальной шероховатой поверхности. Данная система является трехуровневой и состоит из следующих блоков: управления походкой, формирования задающих воздействий и управления звеньями. Наибольшее внимание уделено системе формирования задающих воздействий, а именно входящей в нее системе корректировки длин звеньев робота и формирования законов изменения углов их поворота. Корректировка длин звеньев может быть необходима, например, для изменения конфигурации устройства при фиксации на поверхности двух крайних опор, что и рассматривается в данной работе. Предложен последовательный трехэтапный алгоритм корректировки, при котором вначале варьируется длина центрального звена, затем одного из боковых и затем второго бокового звена. Каждый последующий этап осуществляется только при недостаточности предыдущего для исключения попадания робота в особые положения, при которых происходит потеря всех степеней подвижности. Предложенная структура системы управления выстроена таким образом, чтобы, с одной стороны, непосредственно определить влияние геометрических параметров робота на характер получаемого движения, а с другой – получить простоту в алгоритмической и программной реализации предложенного закона управления, позволяя реализовать систему управления на крайне простых вычислителях. Адекватность работы разработанной системы управления проверена путем численного моделирования движения робота и построения диаграмм вариантов корректировки в зависимости от допустимых значений удлинения/укорочения звеньев и начальной и конечной конфигураций объекта.

Ключевые слова: ползающий робот, система управления, блок управления походкой, блок формирования задающих воздействий, блок управления звеньями, система корректировки.

¹ Работа выполнена в рамках Гранта Президента МК-200.2019.1.

² Людмила Юрьевна Ворочаева, к.т.н., доцент (mila180888@yandex.ru).

³ Сергей Игоревич Савин, к.т.н., с.н.с. (s.savin@innopolis.ru).

1. Введение

Области применения многозвенных ползающих роботов, а также выполняемые ими задачи очень разнообразны. К ним относятся: проведение разведывательных и поисковых мероприятий в труднодоступных для человека и роботов других типов местах, осуществление мониторинга местности, проникновение в узкие лазы и щели для сбора информации, обследование трубопроводных систем на наличие повреждений и прорывов [10, 14, 20, 22, 29]. Решение указанных задач требует разработки совершенно разных по конструкции, числу звеньев, типам соединений между звеньями, а также принципам перемещения ползающих роботов [1–4, 15, 16, 23]. Одной из важных задач, решаемых с помощью ползающих роботов, является проведение поисковых операций внутри частично разрушенных зданий, например, после природных и техногенных катастроф. Это накладывает определенные требования на конструкцию робота и принципы его движения: робот должен быть маневренным, способным перемещаться по поверхностям с препятствиями, а также в пространствах ограниченного объема.

Рассматриваемый в данной работе ползающий робот представляет собой змееподобную конструкцию, отличием которой является использование телескопических звеньев переменной длины, а также возможность управления коэффициентами трения в опорах всех звеньев, что обеспечивает периодическую фиксацию опор на поверхности [30–32, 34]. Это позволяет повысить маневренность устройства по сравнению с другими ползающими роботами за счет реализации большего набора походок, обусловленного конструктивными особенностями, а также обеспечивает более широкий спектр вариантов преодоления препятствий [33].

Подходы к управлению ползающими роботами можно условно разделить на две группы: базирующиеся на математической модели устройства и независимые от нее. Более распространенными и детально изученными являются подходы именно второй группы, что обусловлено возможностью их применения для различных конструкций ползающих роботов без необходи-

мости адаптации к каждому конкретному устройству. Среди них можно выделить следующие: центральный генератор походок (CPG) [8, 9, 19, 21, 25, 35–37], итеративное управление с обучением (ILC) [7], управление с переключаемыми режимами (CLM). Последнее представлено многозвенным роботом с несколькими плавниками (MAMFR) [6]. Подходы, основанные на обучении с подкреплением (RL) [5, 12, 28], на реализации систем типа черный ящик, а также на обратной связи от датчиков робота также являются достаточно широко используемыми. Методы управления движением деформируемых ползающих тенсегрити-роботов, построенные с использованием машинного обучения, нашли отражение в работах [18, 27].

Преимуществом методов управления на основе динамической модели робота [11, 13, 17, 24] является возможность их построения на конструктивных и функциональных особенностях каждого устройства, разработке тех режимов движения, которые характерны только для изучаемого робота. Поэтому целью работы является разработка системы управления движением змееподобного ползающего робота с телескопическими звеньями во время изменения его конфигурации при фиксации на поверхности двух крайних опор. Данная система будет базироваться на трехэтапном последовательном алгоритме управления длинами звеньев объекта, что является особенностью изучаемого устройства.

2. Описание ползающего робота

Расчетная схема исследуемого робота в горизонтальной плоскости Oxy приведена на рис. 1а [30].

Робот представляет собой цепочку из трех звеньев $i = 1, 2, 3$, каждое из которых состоит из двух элементов 4 и 5, соединенных между собой приводом поступательного движения 6 (рис. 1б). Длины звеньев равны l_i , $i = 1, 2, 3$. Звенья соединены между собой приводами вращательного движения 7 и 8, установленными в точках O_2 и O_3 и обеспечивающими повороты звеньев на углы φ_i , отсчитываемые от положительного направления оси Ox против часовой стрелки.

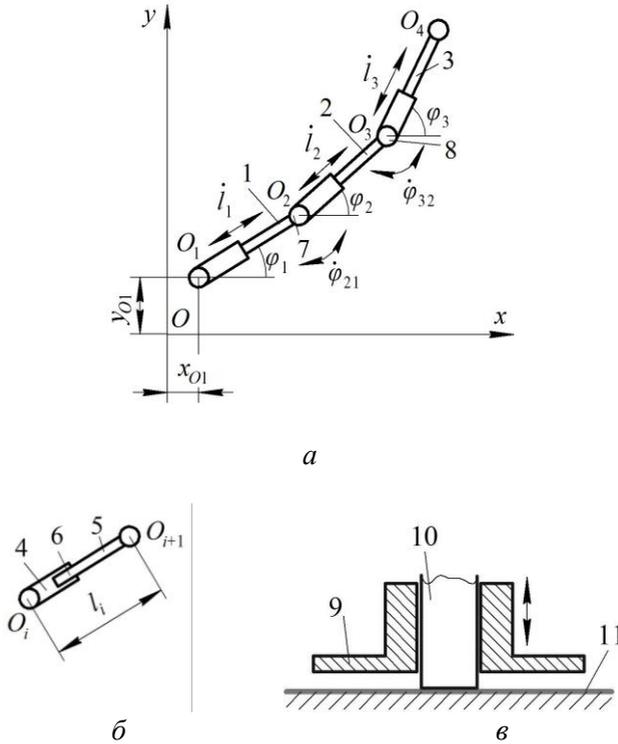


Рис. 1. Расчетные схемы: а) трехзвенного ползающего робота; б) одного звена робота

Вектор обобщенных координат, описывающий движение данного устройства, можно записать следующим образом:

$$(1) \mathbf{q} = (x_{O_1}, y_{O_1}, l_1, l_2, l_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T,$$

где x_{O_1}, y_{O_1} – координаты точки O_1 .

В точках O_1 – O_4 располагаются опоры робота, при помощи которых объект контактирует с поверхностью. Каждая опора содержит две опорные поверхности 9 и 10 с разными коэффициентами трения $f_9 = f_{\max}$ (максимальный) и $f_{10} = f_{\min}$ (минимальный), которые попеременно располагаются на поверхности 11 за счет работы линейного привода (рис. 1в). Это позволяет

управлять коэффициентами трения между ними и поверхностью следующим образом [31, 32, 34]

$$(2) \quad f_{O_1-4} = \begin{cases} f_{\max}, & \text{если } (N_9 > 0) \wedge (N_{10} = 0), \\ f_{\min}, & \text{если } (N_9 = 0) \wedge (N_{10} > 0), \end{cases}$$

где f_{O_1-4} – коэффициент трения в опорах O_1 – O_4 , N_9 , N_{10} – нормальные реакции между плоскостью движения робота и опорными поверхностями 9 и 10.

Будем считать, что такое управление коэффициентами трения обеспечивает фиксацию опор на поверхности при f_{\max} или их движение при f_{\min} :

$$(3) \quad x_{O_1-4}, y_{O_1-4} = \begin{cases} \text{const}, & \text{если } f_{O_1-4} = f_{\max}, \\ x_{O_1-4}(t), y_{O_1-4}(t), & \text{если } f_{O_1-4} = f_{\min}. \end{cases}$$

что, в свою очередь, обеспечивает осуществление роботом управляемых движений при фиксации на плоскости двух его опор. Необходимо указать, что фиксация опор на поверхности возможна в некотором диапазоне длин звеньев, скоростей их изменения и угловых скоростей звеньев, когда возникающая в опорах сила трения не превышает силу трения покоя. В рамках данной статьи этот вопрос детально не исследован, но принято допущение, что указанные ранее значения находятся в соответствующих диапазонах и фиксация на поверхности опор обеспечивается при достижении коэффициентом трения значения f_{\max} .

Следует отметить, что особенностью конструкции исследуемого устройства является то, что каждое звено представляет собой два элемента, соединенных линейным приводом в поступательную пару, что позволяет варьировать длины звеньев в допустимых диапазонах. Это повышает проходимость устройства, делает его более маневренным. Также отличием предложенной конструкции является наличие управления коэффициентом трения в опорах устройства, что позволяет роботу совершать управляемые движения по поверхности при фиксации на ней двух опор, а также повышает скорость его перемещения.

3. Система управления ползающим роботом

Движение ползающего робота по поверхности осуществляется за счет управления его звеньями (их углами и при необходимости длинами) и коэффициентами трения в опорных элементах. Система управления устройством является трехуровневой:

- 1-й уровень – блок управления походкой;
- 2-й уровень – блок формирования задающих воздействий;
- 3-й уровень – блок управления звеньями;

ее структурная схема приведена на рис. 2.

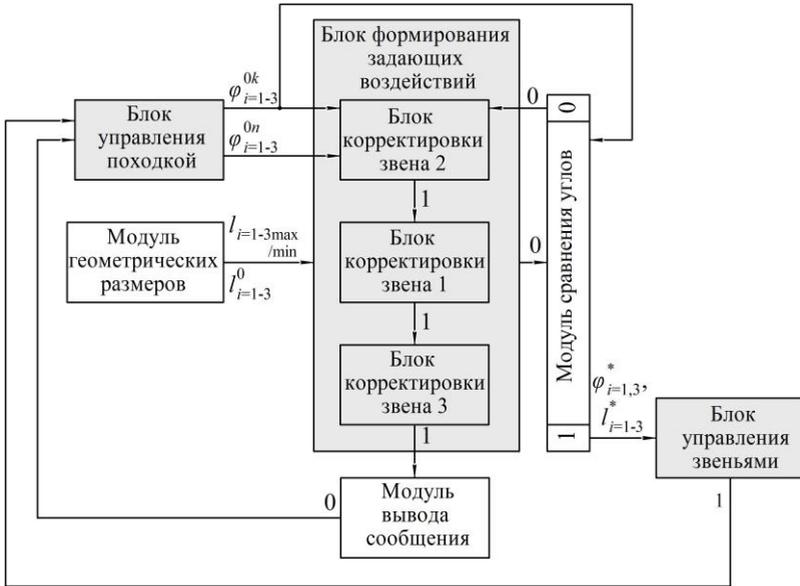


Рис. 2. Структурная схема системы управления ползающим роботом

Здесь приняты следующие обозначения: $\varphi_{i=1-3}^{0n}$, $\varphi_{i=1-3}^{0k}$ – углы поворота звеньев в начальный и конечный моменты этапа движения; $I_{i=1-3}^{\max/\min}$ – максимальное/минимальное значение дли-

ны звена i робота; $l_{i=1-3}^0$ – начальные длины звеньев, $\varphi_{i=1-3}^*$, $l_{i=1-3}^*$ – законы изменения углов поворота звеньев и их длин (задающие воздействия); 1, 0 – «флаги», соответствующие сигналам «да» и «нет» соответственно.

Следует отметить, что первый и второй уровни системы управления работают до начала реализации роботом движения, а третий уровень работает в режиме реального времени в процессе перемещения устройства.

Помимо непосредственно блоков управления в структуре системы управления можно выделить модуль геометрических размеров, модуль сравнения углов, модуль вывода сообщения о невозможности движения, что будет рассмотрено в дальнейшем.

4. Блок управления походкой

Блок управления походкой оценивает состояние поверхности, по которой должен перемещаться робот: объем пространства, форму поверхности, расположение препятствий, их размеры и конфигурацию и т.д. На основании этой информации, а также с учетом данных о текущем положении устройства блок определяет конечное положение, в которое должен перейти объект на данном этапе движения, и способ реализации этого движения (фиксируемые на поверхности опоры, совершаемые звеньями движения, ограничения, накладываемые на движения звеньев).

В качестве примера движения робота, наиболее полно иллюстрирующего работу системы управления его звеньями, рассмотрим изменение конфигурации устройства при фиксации на поверхности двух крайних опор – точек O_1 и O_4 (данные опоры на рис. 3 закрашены черным):

$$(4) \quad x_{O_1} = \text{const}, \quad y_{O_1} = \text{const}, \quad x_{O_4} = \text{const}, \quad y_{O_4} = \text{const}.$$

Это достигается путем управления коэффициентами трения в опорах:

$$(5) \quad f_{O_1} = f_{O_4} = f_{\max}, \quad f_{O_2} = f_{O_3} = f_{\min}.$$

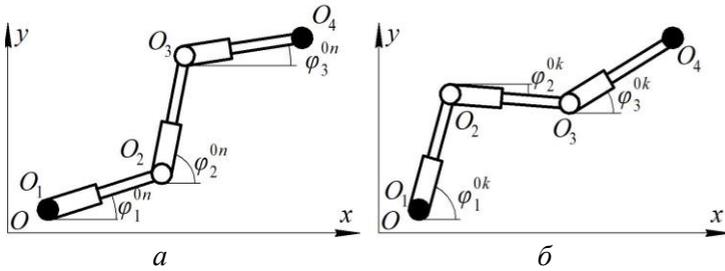


Рис. 3. Начальное (а) и конечное (б) положения робота

Пусть в начальный момент движения $x_{O_1}(0) = x_{O_1}^{0n}$, $y_{O_1}(0) = y_{O_1}^{0n}$, $\varphi_i(0) = \varphi_i^{0n}$, длины звеньев $i = 1, 2, 3$ равны $l_i(0) = l_i^0$, где l_i^0 – некоторые начальные для этапа движения величины (рис. 3а).

Координаты зафиксированной точки O_4 в начальном положении определяются по формулам

$$(6) \quad x_{O_4}^{0n} = x_{O_1}^{0n} + l_1^0 \cos \varphi_1^{0n} + l_2^0 \cos \varphi_2^{0n} + l_3^0 \cos \varphi_3^{0n},$$

$$(7) \quad y_{O_4}^{0n} = y_{O_1}^{0n} + l_1^0 \sin \varphi_1^{0n} + l_2^0 \sin \varphi_2^{0n} + l_3^0 \sin \varphi_3^{0n},$$

а точек O_2 и O_3 следующим образом:

$$(8) \quad x_{O_2}^{0n} = x_{O_1}^{0n} + l_1^0 \cos \varphi_1^{0n},$$

$$(9) \quad y_{O_2}^{0n} = y_{O_1}^{0n} + l_1^0 \sin \varphi_1^{0n},$$

$$(10) \quad x_{O_3}^{0n} = x_{O_1}^{0n} + l_1^0 \cos \varphi_1^{0n} + l_2^0 \cos \varphi_2^{0n},$$

$$(11) \quad y_{O_3}^{0n} = y_{O_1}^{0n} + l_1^0 \sin \varphi_1^{0n} + l_2^0 \sin \varphi_2^{0n}.$$

Из указанного начального положения робот должен перейти в конечное, показанное на рис. 3б, которое определено в результате работы блока управления походкой. Детально работу этого блока здесь рассматривать не будем. Координаты точек O_1 и O_4 остаются неизменными, а углы поворота звеньев достигают значений φ_i^{0k} . Информация о начальных φ_i^{0n} и конечных φ_i^{0k} углах звеньев и накладываемых на движения звеньев ограничениях передается из блока управления походкой в блок формирования задающих воздействий.

5. Блок формирования задающих воздействий

Данный блок определяет законы изменения углов поворота звеньев φ_i^* , а также их длин l_i^* (рис. 4). В работе предлагается использовать последовательный трехэтапный алгоритм корректировки длин звеньев: вначале длины корпуса, затем при необходимости одного из боковых звеньев и только потом второго бокового звена. В этой и последующих схемах блоки и модули, не относящиеся непосредственно к рассматриваемым схемам, показаны штриховыми линиями.

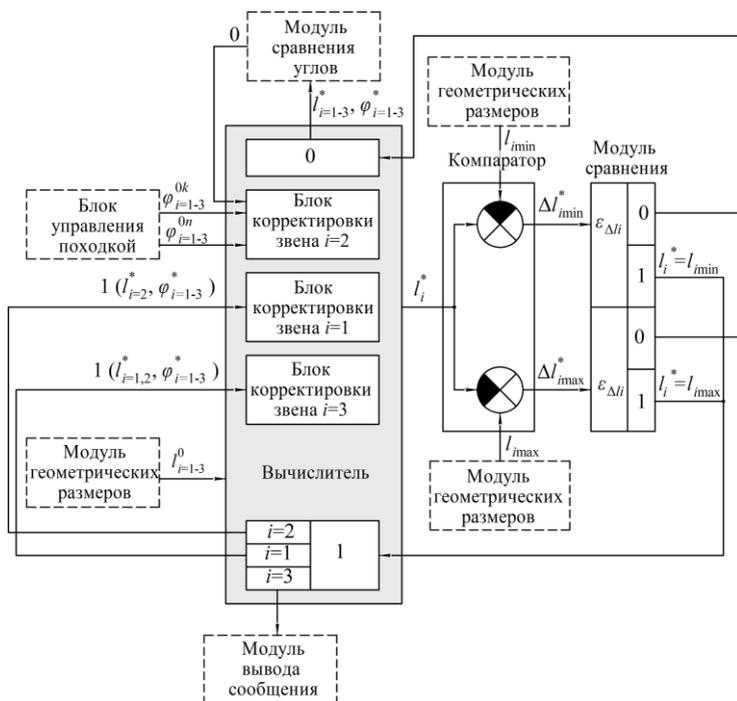


Рис. 4. Структурная схема блока формирования задающих воздействий

Информация о начальных φ_i^{0n} и конечных φ_i^{0k} углах поворота звеньев из блока управления походкой поступает в блок

корректировки звена $i = 2$. Начинается первый этап корректировки – варьирование длины корпуса. На этом этапе длины двух боковых звеньев равны начальным значениям $l_1^* = l_1^0$, $l_3^* = l_3^0$, информация о которых поступает из модуля геометрических размеров, а их повороты происходят с угловыми скоростями $\dot{\varphi}_1^*$ и $\dot{\varphi}_3^*$, законы изменения которых могут быть различными, так как это не влияет на предложенный алгоритм управления длинами звеньев устройства.

Координаты точек O_2 и O_3 определяются по формулам

$$(12) \quad x_{O_2} = x_{O_1}^{0n} + l_1^0 \cos \varphi_1^*,$$

$$(13) \quad y_{O_2} = y_{O_1}^{0n} + l_1^0 \sin \varphi_1^*,$$

$$(14) \quad x_{O_3} = x_{O_4}^{0n} - l_3^0 \cos \varphi_3^*,$$

$$(15) \quad y_{O_3} = y_{O_4}^{0n} - l_3^0 \sin \varphi_3^*.$$

Требуемая длина звена 2 при этом задается следующим образом:

$$(16) \quad l_2^* = \sqrt{(x_{O_3} - x_{O_2})^2 + (y_{O_3} - y_{O_2})^2},$$

а угол поворота данного звена высчитывается по формуле

$$(17) \quad \varphi_2^* = \arctg \left(\frac{y_{O_3} - y_{O_2}}{x_{O_3} - x_{O_2}} \right).$$

Информация о рассчитанном значении длины корректируемого звена поступает на компаратор, в этот же блок поступают $l_{i\max}$ и $l_{i\min}$ – соответственно максимально и минимально допустимые с точки зрения конструктивных возможностей устройства значения длины звена i . Последние из них высчитываются в модуле геометрических размеров робота, где заложена информация о начальных значениях l_i^0 длин звеньев и о предельных значениях их удлинения/укорочения $\Delta l_{i\max}$ и $\Delta l_{i\min}$, по формулам

$$(18) \quad l_{i\max} = l_i^0 + \Delta l_{i\max}, \quad l_{i\min} = l_i^0 - \Delta l_{i\min}.$$

В результате вычислений в компараторе на его выходе формируются сигналы

$$(19) \quad \Delta l_{i\max}^* = \Delta l_{i\max} - l_i^*, \quad \Delta l_{i\min}^* = l_i^* - l_{i\min}$$

расхождения требуемого значения длины звена с максимальной и минимальной величинами. Эти сигналы передаются в модуль сравнения, в котором определяется принадлежность полученных расхождений допустимому диапазону $[-\varepsilon_{\Delta li}, \varepsilon_{\Delta li}]$, где $\varepsilon_{\Delta li}$ – некоторое крайне малое значение удлинения/укорочения звена. В зависимости от результатов сравнения на выходе блока может возникать сигнал «1» («да») или «0» («нет»):

$$(20) \quad \begin{cases} 0, & \text{если } (\Delta l_{i\max}^* \notin [-\varepsilon_{\Delta li}, \varepsilon_{\Delta li}]) \wedge (\Delta l_{i\min}^* \notin [-\varepsilon_{\Delta li}, \varepsilon_{\Delta li}]), \\ 1, & \text{если } (\Delta l_{i\max}^* \in [-\varepsilon_{\Delta li}, \varepsilon_{\Delta li}]) \vee (\Delta l_{i\min}^* \in [-\varepsilon_{\Delta li}, \varepsilon_{\Delta li}]). \end{cases}$$

Если на выходе модуля сравнения получен сигнал «1», это означает, что требуемая длина звена i достигла своего минимального или максимального значения и это звено больше не может укорачиваться или удлиняться. В этом случае необходимо перейти на следующий этап корректировки. Для этого сигнал «1» поступает на вычислитель (блок «1»), а из него выходит сигнал, содержащий информацию о рассчитанных углах поворота звеньев и длине корректируемого звена, который поступает в блок корректировки следующего звена. Причем в вычислителе происходит переключение между звеньями, длины которых корректируются: если описанный алгоритм был применен для звена 2, то следующим корректируемым звеном будет звено 1, а если корректировка выполнялась для звена 1, то информация будет поступать в блок корректировки звена 3.

Если в модуле сравнения получен сигнал «0», это означает, что требуемая длина звена находится в допустимых пределах. В этом случае сигнал «0» также поступает на вычислитель (блок «0»), но из него информация о рассчитанных углах и длинах звеньев передается в модуль сравнения углов. Если робот не достиг своего конечного положения, то сигнал «0» поступает из модуля сравнения углов, работа которого будет детально описана в дальнейшем, в блок корректировки звена $i = 2$, продолжается расчет задающих воздействий.

Перейдем к рассмотрению второго этапа корректировки (блок корректировки звена $i = 1$), когда требуемая длина звена 2 равна своему минимальному или максимальному значению и не изменяется ($l_2^* = l_{2\min}$) \vee ($l_2^* = l_{2\max}$), а длина звена 3 равна

начальному значению $l_3^* = l_3^0$. Тогда координаты точки O_3 вычисляются по формулам (14) и (15), а точки O_2 равны

$$(21) \quad x_{O_2} = x_{O_4}^{0n} - l_3^0 \cos \varphi_3^* - l_{2\max/\min} \cos \varphi_2^*,$$

$$(22) \quad y_{O_2} = y_{O_4}^{0n} - l_3^0 \sin \varphi_3^* - l_{2\max/\min} \sin \varphi_2^*.$$

Требуемый угол поворота звена 3 изменяется по закону φ_3^* , а звена 2 – по закону (17), определенному на первом этапе корректировки при условии, что длины боковых звеньев начальные. Тогда на данном этапе в блоке корректировки звена $i = 1$ определяются его длина l_1^* и угол φ_1^* :

$$(23) \quad l_1^* = \sqrt{(x_{O_2} - x_{O_1})^2 + (y_{O_2} - y_{O_1})^2},$$

$$(24) \quad \varphi_1^* = \operatorname{arctg} \left(\frac{y_{O_2} - y_{O_1}}{x_{O_2} - x_{O_1}} \right).$$

Дальнейший алгоритм корректировки длины звена $i = 1$ такой же, как и ранее описанный. Если корректировки длины звена 1 недостаточно для достижения конечного положения, то необходимо перейти к третьему этапу корректировки – управлению длиной звена 3 и углом его поворота. При этом в блок корректировки звена $i = 3$ поступает сигнал о ранее скорректированных длинах звеньев 1 и 2, а также о вычисленных углах поворота φ_i^* . Длины звеньев 1 и 2 равны минимальным или максимальным: $(l_{i=1,2}^* = l_{i=1,2\min}^*) \vee (l_{i=1,2}^* = l_{i=1,2\max}^*)$, а углы их поворота высчитываются по формулам (17) и (24) для тех длин звеньев, которые были на первом и втором этапах корректировки. Координаты точек O_2 и O_3 определяются следующим образом:

$$(25) \quad x_{O_2} = x_{O_1}^{0n} + l_{1\max/\min} \cos \varphi_1^*,$$

$$(26) \quad y_{O_2} = y_{O_1}^{0n} + l_{1\max/\min} \sin \varphi_1^*,$$

$$(27) \quad x_{O_3} = x_{O_1}^{0n} + l_{1\max/\min} \cos \varphi_1^* + l_{2\max/\min} \cos \varphi_2^*,$$

$$(28) \quad y_{O_3} = y_{O_1}^{0n} + l_{1\max/\min} \sin \varphi_1^* + l_{2\max/\min} \sin \varphi_2^*.$$

Длина звена 3 при этом равна

$$(29) \quad l_3^* = \sqrt{(x_{O_4} - x_{O_3})^2 + (y_{O_4} - y_{O_3})^2},$$

а угол его поворота вычисляется по формуле

$$(30) \varphi_3^* = \arctg \left(\frac{y_{O4} - y_{O3}}{x_{O4} - x_{O3}} \right).$$

Если на выходе модуля сравнения формируется сигнал «1», это означает, что длина звена 3 достигла своего максимально или минимально допустимого значения. Это, в свою очередь, свидетельствует о том, что робот попадает в особое положение, при котором его звенья будут зафиксированы, дальнейшее перемещение устройства невозможно. Поэтому сигнал «0» подается на модуль сообщения о невозможности движения, а затем – в блок управления походкой, который будет определять новое конечное положение механизма. В противном случае формирование задающих воздействий завершится при достижении роботом конечного положения, что определяется в модуле сравнения углов.

6. Модуль сравнения углов

Сигнал «0» из блока корректировки каждого из звеньев поступает на модуль сравнения углов. Данный модуль состоит из компаратора и модуля сравнения и позволяет установить, достиг ли робот своего конечного положения или нет (рис. 5).

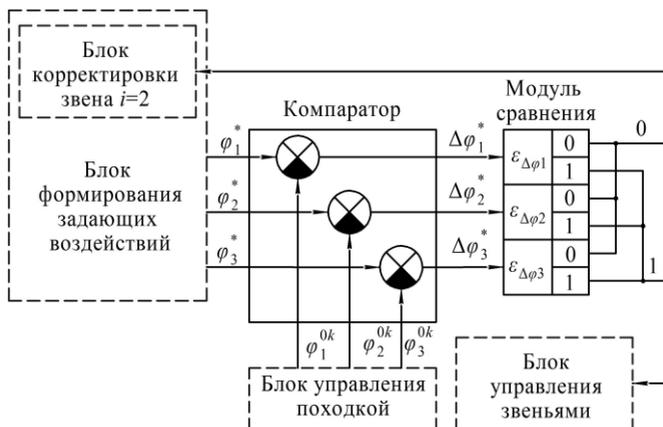


Рис. 5. Структурная схема модуля сравнения углов

На компаратор модуля поступает информация о вычисленных углах поворота звеньев φ_i^* , $i = 1, 2, 3$, а также значения конечных углов φ_i^{0k} . На выходе компаратора формируются сигналы ошибок по каждому углу $i = 1, 2, 3$:

$$(31) \Delta\varphi_i^* = \varphi_i^* - \varphi_i^{0k}.$$

Эти ошибки поступают в модуль сравнения, где устанавливается их попадание в допустимый диапазон $[-\varepsilon_{\Delta\varphi i}, \varepsilon_{\Delta\varphi i}]$ и формирование сигнала «1» или «0»:

$$(32) \begin{cases} 0, & \text{если } (\Delta\varphi_i^* \notin [-\varepsilon_{\Delta\varphi i}, \varepsilon_{\Delta\varphi i}]), \\ 1, & \text{если } (\Delta\varphi_i^* \in [-\varepsilon_{\Delta\varphi i}, \varepsilon_{\Delta\varphi i}]). \end{cases}$$

Если рассчитанные углы поворота не являются конечными (сигнал «0»), то необходимо дальнейшее определение задающих воздействий в виде длин звеньев и их углов поворота, поэтому данный сигнал поступает в блок формирования задающих воздействий, а именно в блок корректировки звена $i = 2$. В противном случае при достижении роботом конечного положения сигнал «1» поступает на третий уровень системы управления – в блок управления звеньями робота. Этот сигнал содержит информацию о рассчитанных углах φ_i^* и длинах l_i^* звеньев (задающие воздействия).

7. Блок управления звеньями

Блок управления звеньями (рис. 6) состоит из пяти параллельно функционирующих контуров управления: тремя длинами звеньев $l_{i=1-3f}$ и двумя углами их поворота φ_{1f} и φ_{3f} ; угол звена 2 не является управляемой величиной, так как однозначно определяется кинематикой робота. Индекс f соответствует фактически определенным углам и длинам звеньев. В блок контуров управления из модуля сравнения углов приходят сигналы задающих воздействий, а на его выходе формируются сигналы фактических значений управляемых величин $l_{i=1-3f}$, φ_{1f} , φ_{3f} .

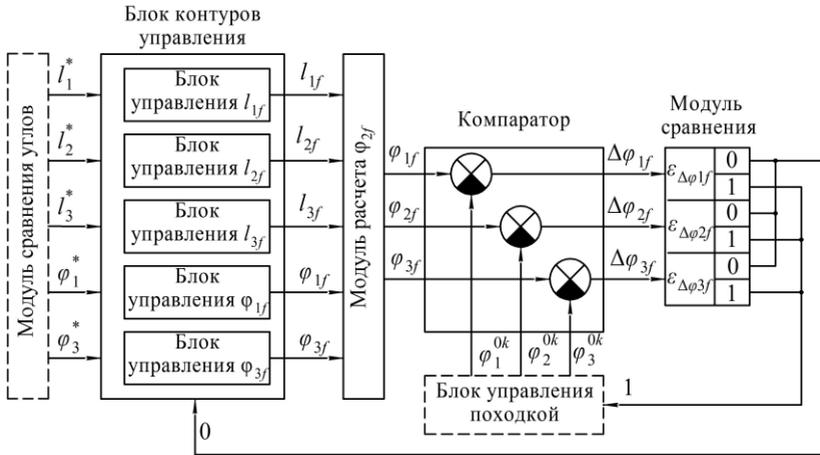


Рис. 6. Структурная схема блока управления звеньями

Рассмотрим более детально работу каждого контура (рис. 7). В этой схеме задающее воздействие обозначено как q_k^* , $k = 1, \dots, 5$: $q_1^* = l_1^*$, $q_2^* = l_2^*$, $q_3^* = l_3^*$, $q_4^* = \varphi_1^*$, $q_5^* = \varphi_3^*$.

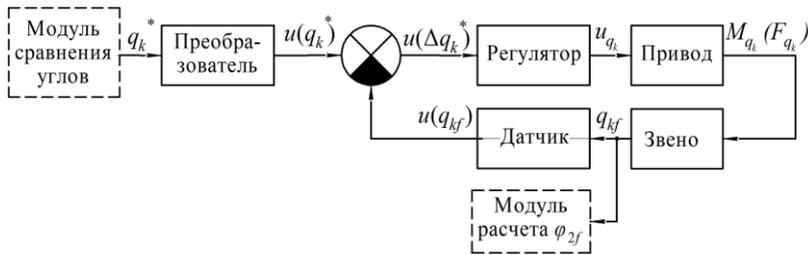


Рис. 7. Структурная схема одного контура блока управления звеньями

Сигнал из модуля сравнения углов поступает в преобразователь, где законы изменения задающих воздействий преобразуются в соответствующие законы изменения напряжения $u(q_k^*)$. Полученный в преобразователе сигнал подается на компаратор, на другой вход которого подается сигнал напряжения $u(q_{kf})$, соответствующего фактическому значению q_{kf} . На выходе

компаратора генерируется сигнал напряжения, пропорционального ошибке рассогласования

$$(33) u(\Delta q_k) = u(q_k^*) - u(q_{kf}),$$

который затем поступает в регулятор, где формируется управляющий сигнал $u(q_k)$. Этот сигнал поступает на соответствующий привод, который генерирует силу $F_{qk=1,3}$ для управления длиной звена или момент $M_{qk=4,5}$ для управления углом его поворота. Сила или момент подаются на звено, которое изменяет свою длину или угол поворота на фактическую величину q_{kf} , измеряемую датчиком линейного или углового перемещения. На выходе датчика генерируется сигнал напряжения, пропорционального фактическому значению длины или угла поворота звена $u(q_{kf})$.

Фактическое значение каждой управляемой величины поступает в модуль расчета угла поворота звена 2, где он определяется по формуле (17), координаты точек O_2 и O_3 при этом вычисляются следующим образом:

$$(34) x_{O2f} = x_{O1}^{0n} + l_{1f} \cos \varphi_{1f},$$

$$(35) y_{O2f} = y_{O1}^{0n} + l_{1f} \sin \varphi_{1f},$$

$$(36) x_{O3f} = x_{O4}^{0n} - l_{3f} \cos \varphi_{3f},$$

$$(37) y_{O3f} = y_{O4}^{0n} - l_{3f} \sin \varphi_{3f}.$$

Затем сигналы фактически рассчитанных углов φ_{if} передаются на компаратор (рис. 6), в котором происходит определение ошибки $\Delta\varphi_{if}$ рассогласования между ними и конечными значениями углов φ_i^{0k} , которые также подаются на компаратор из блока управления походкой:

$$(38) \Delta\varphi_{if} = \varphi_{if} - \varphi_i^{0k}.$$

Данные ошибки поступают в модуль сравнения, где в зависимости от результатов их сравнения с предельно допустимым значением погрешности вычислений $\varepsilon_{\Delta\varphi_{if}}$ формируются сигналы «0» или «1»:

$$(39) \begin{cases} 0, & \text{если } (\Delta\varphi_{if} \notin [-\varepsilon_{\Delta\varphi_{if}}, \varepsilon_{\Delta\varphi_{if}}]), \\ 1, & \text{если } (\Delta\varphi_{if} \in [-\varepsilon_{\Delta\varphi_{if}}, \varepsilon_{\Delta\varphi_{if}}]). \end{cases}$$

При получении на выходе модуля сравнения сигнала «0» продолжается расчет фактических углов поворота звеньев (данный сигнал поступает в блок контуров управления), так как они еще не достигли конечных значений. В противном случае, т.е. когда фактическое положение звеньев робота соответствует конечному, сигнал «1» передается в блок управления походкой. Это означает, что данный этап движения выполнен, и конечное положение, в котором находится робот, становится начальным для следующего этапа походки.

Рассмотрим динамику системы управления с обратной связью для одного из приводов робота. Пусть положение вала привода описывается переменной φ , текущее значение задающего воздействия дано как $\varphi^*(t)$. Динамика φ задается дифференциальным уравнением

$$(40) J\ddot{\varphi} + \mu\dot{\varphi} = v + f_{ext},$$

где J – момент инерции вала двигателя; μ – коэффициент вязкого трения; v – момент, создаваемый электроприводом, пропорциональный току в его обмотках; f_{ext} – действующие на привод внешние силы, включая действие полезной нагрузки.

Предположим, что действие полезной нагрузки можно вычислить точно. Тогда, используя пропорционально-дифференциальный регулятор

$$(41) v = J\ddot{\varphi}^* + \mu\dot{\varphi}^* - f_{ext} + k_p(\varphi^* - \varphi) + k_d(\dot{\varphi}^* - \dot{\varphi}),$$

где k_p и k_d – коэффициенты регулятора, получим САУ с обратной связью. Определим критерии устойчивости этой САУ.

Введем замену

$$(42) e = \varphi^* - \varphi$$

и подставим (41) в (40):

$$(43) J\ddot{e} + \mu\dot{e} + k_d\dot{e} + k_p e = 0.$$

Рассмотрим функцию Ляпунова

$$(44) V = \dot{e}^2 + e^2.$$

Полная производная этой функции с учетом динамики (42) имеет вид

$$(45) \dot{V} = 2\dot{e}\ddot{e} + 2e\dot{e} = -2\dot{e} \frac{1}{J} (\mu\dot{e} + k_d\dot{e} + k_p e) + 2e\dot{e} .$$

Примем $k_p = J$, тогда $\dot{V} = -\left(2\frac{\mu}{J} + 2\frac{k_d}{J}\right)\dot{e}^2$. Так как J и μ – положительные числа, достаточно выбрать любое положительное значение для k_d , чтобы функция Ляпунова была всюду положительной, а её производная в направлении динамики системы – всюду отрицательной, что демонстрирует устойчивость системы.

Заметим, что на практике не всегда возможно точно вычислить f_{ext} , кроме того, сенсорная информация является зашумленной, а также имеют место внешние возмущения случайного характера. Для учета влияния таких процессов могут использоваться наблюдатели возмущений, а при условии, что эти случайные процессы могут быть описаны как гауссовы с известной матрицей ковариации, может быть реализован фильтр Калмана. Влияние нелинейностей в сенсорной системе на поведение многозвенных систем было описано в работе [26], где рассматривался ряд возможных реализаций управления с обратной связью.

8. Исследование работы системы управления роботом

В данном разделе представлены результаты численного исследования движения робота при работе разработанной системы управления. Моделирование проведено на примере частного случая изменения конфигурации робота, показанного на рис. 8. Робот в момент начала движения находится в положении, при котором $x_{o1}^{0n} = 0$, $y_{o1}^{0n} = 0$, звенья $i = 1, 2, 3$ располагаются под следующими углами: $\varphi_1^{0n} = \varphi^* - \pi$, $\varphi_2^{0n} = 0$, $\varphi_3^{0n} = 0$, угол $\varphi^* \in [10^0, 170^0]$ представляет собой угол между звеньями 1 и 2. В конечном положении углы поворота звеньев достигают значе-

ний $\varphi_1^{0k} = 0$, $\varphi_2^{0k} = 0$, $\varphi_3^{0k} = \varphi^* - \pi$.

В рассматриваемом примере для достижения конечного положения звено 1 робота должно поворачиваться против часовой стрелки относительно неподвижной опоры O_1 , а звено 4 – по часовой стрелке относительно зафиксированной опоры O_4 . Будем считать, что повороты звеньев происходят с равными по модулю, но противоположными по направлению угловыми скоростями, что является некоторым частным случаем, удобным для анализа графиков моделирования:

$$(46) \dot{\varphi}_1^* = -\dot{\varphi}_3^*.$$

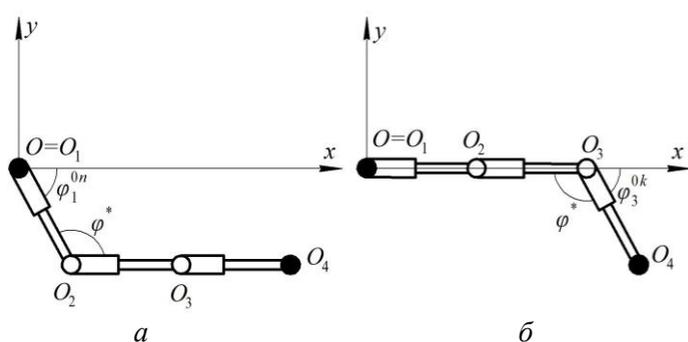


Рис. 8. Начальное (а) и конечное (б) положения робота во время численного эксперимента

Начальные длины звеньев устройства в безразмерных величинах равны $l_{i=1-3}^0 = 1$, угол φ^* изменяется в диапазоне $\varphi^* \in [10^0, 170^0]$, $\Delta l_{im} \in [0, 1]$, $\Delta l_{imax} = \Delta l_{imin} = \Delta l_{im}$, $\Delta l_{1m} = \Delta l_{3m}$.

Пусть p :

$$(47) p = \frac{\Delta l_{1m}}{\Delta l_{2m}}$$

соответствует отношению предельно допустимых значений удлинения/укорочения звеньев 1 и 2, тогда $p \in [0, 2, 2]$.

Введем обозначения

$$(48) k_{2-1} = \frac{\Delta l_1^{2-1}}{\Delta l_{1m}}, k_{1-3} = \frac{\Delta l_1^{1-3}}{\Delta l_{1m}}, k_{3-4} = \frac{\Delta l_1^{3-4}}{\Delta l_{1m}} -$$

параметры, соответствующие отношению значения Δl_1^{2-1} , Δl_1^{1-3} , Δl_1^{3-4} удлинения/укорочения звена 1 в моменты переходов из одного этапа корректировки (первое значение в верхнем индексе) в другой (второе значение в верхнем индексе, «4» соответствует области особых положений) к предельно допустимой величине изменения длины. Это позволяет оценивать не численное значение изменения длины бокового звена, зависящее от параметра p , а его относительную величину.

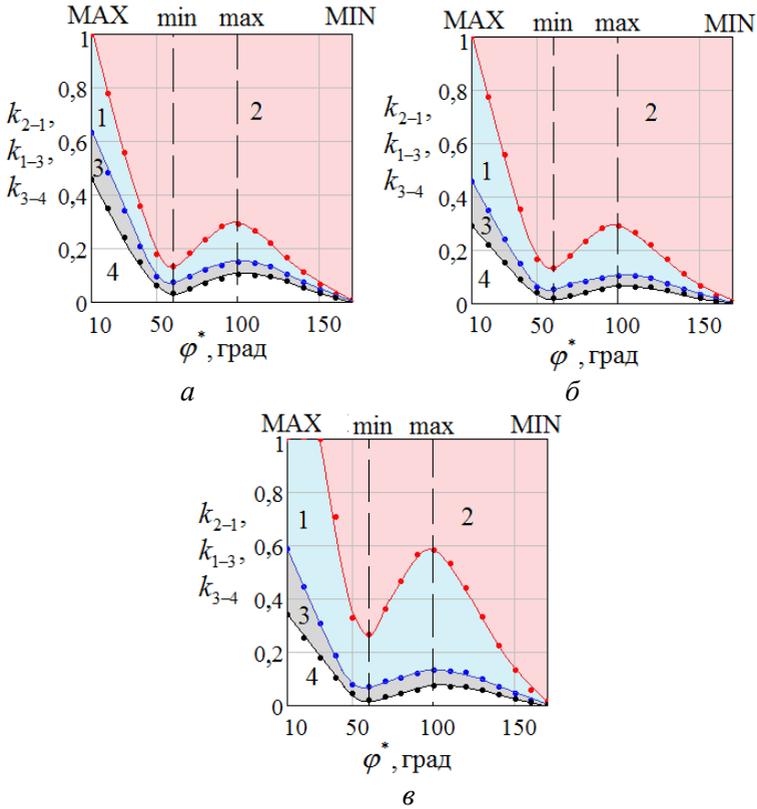


Рис. 9. Диаграммы $\Delta l_{1m}(\varphi^*)$: а) $p = 0,5$; б) $p = 1$; в) $p = 2$;
 1 – корректировка l_1 , 2 – корректировка l_2 ,
 3 – корректировка l_3 , 4 – особые положения

На рис. 9 приведены диаграммы $k_{2-1,1-3,3-4}(\varphi^*)$ при трех соотношениях p , на которых выделены три области параметров, соответствующие этапам корректировки (номер области 1–3 равен номеру звена, длина которого корректируется), а также область 4, при расположении робота в которой его движение в заданную конечную точку будет невозможно за счет достижения особых положений. Зависимости $k_{2-1,1-3,3-4}(\varphi^*)$ соответствуют кривым, разделяющим ранее указанные области между собой и на рисунке не подписаны.

По диаграммам видно, что для перемещения робота при большинстве значений k и φ^* достаточно управления длиной только центрального звена (область 2). По мере уменьшения значения k потребуются дополнительная корректировка длины одного из боковых звеньев (звена 1 в области 1), а при дальнейшем уменьшении k необходимо будет управление длиной и второго бокового звена (звена 3 в области 3). Ниже области 3 располагается область 4, т.е. при малых значениях k управление длинами всех трех звеньев не позволит роботу совершить требуемое перемещение.

Переход из одной области корректировки в другую осуществляется по криволинейному закону, у которого можно выделить глобальные (MAX, MIN) и локальные (max, min) максимумы и минимумы. Глобальный максимум MAX_{2-1} соответствует максимально возможному значению k_{max} (рис. 10а) и при $p \leq 1$ наблюдается при минимальном угле $\varphi_{min}^* = 10^0$, а при $p > 1$ удален от φ_{min}^* на величину $\Delta\varphi_{min}^*$ (рис. 10б), возрастающую по криволинейному закону по мере увеличения p .

Следует отметить, что значение MAX_{2-1} перехода из области корректировки 2 в область 1 всегда равно $MAX_{2-1} = 1$, т.е. этот переход наблюдается при достижении звеном 1 своего предельного значения длины. Кривые MAX перехода между областями 1 и 3, 3 и 4 имеют криволинейный характер с изломом при $p = 1$, в случае $p < 1$ зависимости $MAX_{1-3}(p)$, $MAX_{3-4}(p)$ убывают по кривым, обращенным выпуклостью вниз, при $p = 1$ достигают минимального значения, а затем при $p > 1$ возрастают по кривым, выпуклости которых направлены вверх. Причем

наибольшие значения MAX_{1-3} и MAX_{3-4} наблюдаются при минимальной рассматриваемой величине $p = 0,2$.

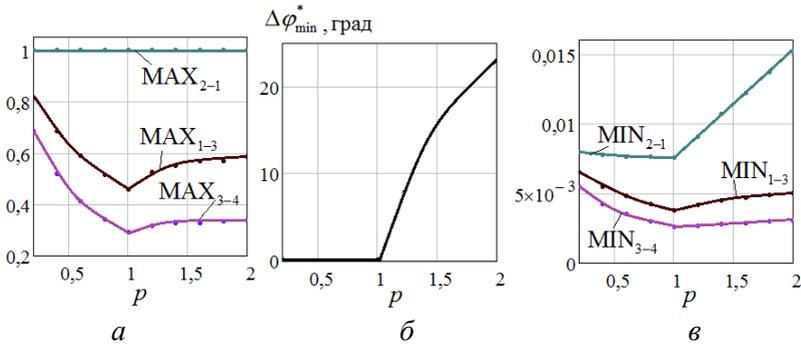


Рис. 10. Графики зависимостей: а) $MAX(p)$; б) $\Delta\varphi_{\min}^*(p)$; в) $MIN(p)$

Глобальный минимум (рис. 10в) переходов между всеми областями корректировки независимо от значения p наблюдается при максимально возможном угле $\varphi_{\max}^* = 170^0$, причем характер изменения $MIN_{1-3}(p)$ и $MIN_{3-4}(p)$ аналогичен ранее построенным кривым $MAX_{1-3}(p)$, $MAX_{3-4}(p)$. Величина $MIN_{2-1}(p)$ при $p \leq 1$ убывает, а при $p > 1$ – возрастает по наклонным прямым. Наибольшее значение зависимости $MIN_{2-1}(p)$ наблюдается при максимальной величине $p = 2$, а зависимостей $MIN_{1-3}(p)$ и $MIN_{3-4}(p)$ – при минимальной величине $p = 0,2$. Наименьшие значения всех зависимостей $MIN(p)$ соответствуют $p = 1$, т.е. равенству предельно допустимых значений удлинения/укорочения всех звеньев.

Локальные минимумы и максимумы функций k наблюдаются при $\varphi^* = 60^0$ и $\varphi^* = 100^0$ соответственно. Характер графиков $\min(p)$ и $\max(p)$ аналогичен зависимостям $MIN(p)$, показанным на рис. 10в.

Для проверки адекватности работы предложенной системы управления проанализируем характер изменения длин звеньев и углов их поворота во времени при каждом из этапов корректи-

ровки. Для этого на рис. 11 и 12 построены графики зависимостей $l_i(t)$ и $\varphi_i(t)$ при $\varphi^* = 30^\circ$ и трех значениях Δl_{1m} для $p = 1$.

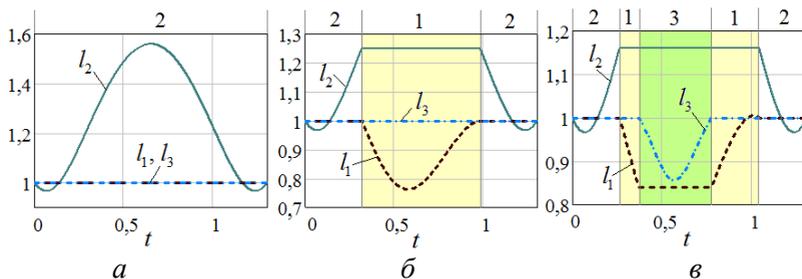


Рис. 11. Графики зависимостей $l_i(t)$, 1–3 – области корректировки звеньев 1–3; а) $\Delta l_{1m} = 0,6$; б) $\Delta l_{1m} = 0,25$; в) $\Delta l_{1m} = 0,16$

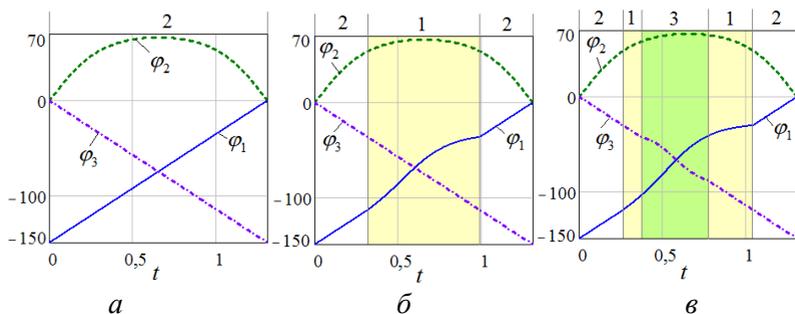


Рис. 12. Графики зависимостей $\varphi_i(t)$; 1–3 – области корректировки звеньев 1–3; а) $\Delta l_{1m} = 0,6$; б) $\Delta l_{1m} = 0,25$; в) $\Delta l_{1m} = 0,16$

На временных зависимостях изменения длин звеньев и углов их поворота выделены области 1–3, соответствующие корректировке длины того или иного звена i . График рис. 11а иллюстрирует, что зависимость $l_2(t)$ симметрична относительно $T/2$, где T – время совершения этапа движения из начального положения в конечное. Уменьшение длины звена 2 несущественно, а возрастание происходит почти на предельно допустимую величину, длины боковых звеньев при этом неизменны. При уменьшении значения Δl_{1m} (рис. 11б) наблюдается «обрез-

ка» графика $l_2(t)$ при достижении ею величины $l_2 = l_{2\max}$, при этом наблюдается корректировка длины звена 1 (ее уменьшение). При дальнейшем уменьшении Δl_{1m} вначале происходит корректировка длины звена 2, во время нее наблюдается достижение длиной звена 2 предельного значения $l_2 = l_{2\max}$, затем происходит корректировка длины звена 1 до тех пор, пока не будет выполняться условие $l_1 = l_{1\min}$, после чего осуществляется корректировка длины звена 3, при этом его длина не достигает предельно допустимого значения.

Следует отметить, что в двух последних случаях наблюдается обратный переход из области управления звеном 1 в область управления звеном 2 (при $\Delta l_{1m} = 0,25$) и из области 3 в область 1, а затем из нее в область 2 (при $\Delta l_{1m} = 0,16$). Причем каждый из переходов происходит при достижении длиной управляемого звена своего начального значения: при переходе 3–1 $l_3 = l_3^0$, при переходе 1–2 $l_1 = l_1^0$. В момент времени T достижения роботом своего конечного положения длины всех звеньев равны начальным величинам $l_i(T) = l_i^0$. Это свидетельствует о корректной работе предложенной системы управления и об адекватности полученных при моделировании результатов.

Перейдем к анализу временных зависимостей углов поворота звеньев (рис. 12). При корректировке длины звена 2 углы поворота боковых звеньев 1 и 3 возрастают и убывают по наклонным прямым таким, что

$$(49) \quad \varphi_1(0) = \varphi_3(T), \quad \varphi_1(T) = \varphi_3(0), \quad \varphi_1(T/2) = \varphi_3(T/2).$$

Угол поворота центрального звена при этом изменяется по криволинейному закону с расположенной вверх выпуклостью, вначале возрастает, достигает максимума, а затем убывает до достижения начального значения, что можно описать следующим образом:

$$(50) \quad \varphi_2(0) = \varphi_2(T) = \varphi_1(T) = \varphi_3(0), \quad \varphi_2(T/2) = \varphi_{2\max}.$$

При дополнительной корректировке длин боковых звеньев характер зависимости $\varphi_2(t)$ не меняется, а зависимости $\varphi_3(t)$ и $\varphi_1(t)$ приобретают нелинейный характер в соответствующих областях управления данными звеньями. При этом начальные и конечные значения углов поворота звеньев остаются неизмен-

ными, что также является подтверждением корректного функционирования разработанной системы управления. Следует отметить, что характер временных зависимостей $\varphi_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, не зависит от величины p .

9. Заключение

Работа посвящена разработке системы управления ползающим по горизонтальной шероховатой поверхности роботом. Данный робот образован тремя звеньями переменной длины, соединенными между собой вращательными шарнирами с установленными в них приводами, а также оснащен опорами с управляемым коэффициентом трения.

Предложена трехуровневая система управления движением устройства, основанная на математической модели устройства, а также на его конструктивных и функциональных особенностях. Преимуществом такой системы являются простота ее алгоритмов по сравнению с работой систем управления, не адаптированных к конкретному роботу, простота и наглядность анализа полученных результатов, а также возможность ее реализации на встроенном в робота микроконтроллере без привлечения дополнительных вычислительных мощностей. Данная система состоит из блока управления походкой, блока формирования задающих воздействий и блока управления звеньями. Особое внимание уделено системе корректировки длин звеньев и формированию законов изменения углов их поворота для перехода из начального положения в конечное (данная система относится к блоку формирования задающих воздействий).

В результате численного моделирования движения робота при изменении его конфигурации при двух зафиксированных на поверхности крайних опорах получены диаграммы относительного удлинения / укорочения боковых звеньев от угла φ^* взаимного расположения звеньев, на которых построены области трех вариантов корректировки длин звеньев, а также область особых положений устройства. Помимо этого построены временные зависимости углов поворота звеньев и изменения их длин при разных вариантах корректировки.

Литература

1. БАШКИРОВ С.А. *Алгоритмы управления движением и моделирование динамики многозвенных механизмов, передвигающихся по принципу бегущей волны* // Изв. РАН. ТиСУ. – 2007. – №1. – С. 168–172.
2. СОРОКИН К.С. *Управление перемещением трехзвенника на плоскости с трением* // Изв. РАН. ТиСУ. – 2009. – №3 – С. 165–176.
3. ЧЕРНОУСЬКО Ф.Л. *Движение многозвенника по горизонтальной плоскости* // ПММ. – 2000. – Т. 64, вып. 1. – С. 8–18.
4. ЧЕРНОУСЬКО Ф.Л., ШУНДЕРЮК М.М. *Влияние сил трения на динамику двузвенного мобильного робота* // ПММ. – 2010. – Т. 74, вып. 1. – С. 22–36.
5. *Building a crawling robot with Q learning.* – URL: <https://medium.com/code-heroku/building-a-crawling-robot-with-q-learning-251e2550d824> [дата доступа:19.02.2020].
6. CHEN K., KAMEZAKI M., KATANO T., KANEKO T., AZUMA K., ISHIDA T., SEKI M., ICHIRYU K., SUGANO S. *Compound locomotion control system combining crawling and walking for multi-crawler multi-arm robot to adapt unstructured and unknown terrain* // Robomech J. – 2018. – Vol. 5, No. 1. – P. 2.
7. CHI H., LI X., LIANG W., CAO J., REN Q. *Iterative learning control for motion trajectory tracking of a circular soft crawling robot* // Front. Robot. AI 6:113. – 2019. – P. 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00113>.
8. CRESPI A., IJSPEERT A.J. *Online optimization of swimming and crawling in an amphibious snake robot* // IEEE Trans. on Robotics. – 2008. – Vol. 24, No. 1. – P.75–87.
9. CRESPI A., LACHAT D., PASQUIER A. IJSPEERT A.J. *Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator* // Autonomous Robots. – 2008. – Vol. 25, No. 1–2. – P. 3–13.

10. FU Q., MITCHEL T., YI N., GART S., LI C. *Snake robot's poor 3-D obstacle traversal reveals snake's better stability mechanisms* // Bulletin of the American Physical Society. – 2014. – Vol. 63, No. 1.
11. GÁLVEZ J.A., DE SANTOS P.G., PFEIFFER F. *Intrinsic tactile sensing for the optimization of force distribution in a pipe crawling robot* // IEEE/ASME Trans. on Mechatronics. – 2001. – Vol. 6, No. 1. – P. 26–35.
12. HA S., KIM J., YAMANE K. *Automated deep reinforcement learning environment for hardware of a modular legged robot* // 15th IEEE Int. Conf. on Ubiquitous Robots. – 2018. – P. 348–354.
13. HEIDARI A.H., MEHRANDEZH M., PARANJAPE R., NAJJARAN H. *Dynamic analysis and human analogous control of a pipe crawling robot* // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – 2009. – P. 733–740.
14. HUANG C.W., HUANG C.H., HUNG Y.H., CHANG C.Y. *Sensing pipes of a nuclear power mechanism using low-cost snake robot* // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10, No. 6. – P. 1–8.
15. ISHIKAWA M. *Iterative feedback control of snake-like robot based on principal fiber bundle modeling* // Int. J. Advanced mechatronic systems. – 2009. – Vol. 1, No. 3. – P. 175–182.
16. JATSUN S., VOROCHAEVA L., YATSUN A., SAVIN S., MALCHIKOV A. *Bio-inspired adaptive control strategy for a snake-like robot* // Proc. 19th IEEE Int. Conf. ICSTCC. – 2015. – P. 273–278.
17. JOEY Z.G., CALDERÓN A.A., PÉREZ-ARANCIBIA N.O. *An earthworm-inspired soft crawling robot controlled by friction* // IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2017. – P. 834–841.
18. KIM K., CHEN L.H., CERA B., DALY M., ZHU E., DESPOIS J., AGOGINO A.K., SUNSPIRAL V., AGOGINO A.M. *Hopping and rolling locomotion with spherical tensegrity robots* // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2016. – P. 4369–4376.

19. LACHAT D., CRESPI A., IJSPEERT A.J. *Boxybot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator* // First IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics. – 2006. – P. 643–648.
20. LI J., SHAN J. *Passivity control of underactuated snake-like robots* // Proc. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2008. – P. 485–490.
21. LILJEBÄCK P., PETTERSEN K.Y., STAVDAHL O., GRAVDAHL J.T. *A review on modelling, implementation, and control of snake robots* // Robotics and Autonomous Systems. – 2012. – Vol. 1. – P. 29–40.
22. LILJEBÄCK P., PETTERSEN K.Y., STAVDAHL O., GRAVDAHL J.T. *Hybrid modelling and control of obstacle-aided snake robot locomotion* // IEEE Trans. Robotics. – 2010. – Vol. 26, No. 5. – P. 781–799.
23. MATSUNO F., SATO H. *Trajectory tracking control of snake robots based on dynamic model* // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 2005. – P. 3029–3034.
24. PFEIFFER F., ROSSMANN T., LOFFLER K. *Control of a tube crawling machine* // 2nd IEEE Int. Conf. Control of Oscillations and Chaos. – 2000. – Vol. 3. – P. 586–591.
25. ROLLINSON D.S. *Control and design of snake robots* // Carnegie Mellon University. – 2014. – 187 p.
26. SAVIN S. *Comparative Analysis of Control Methods for Walking Robots with Nonlinear Sensors* // IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2018. – P. 1–6.
27. SHIBATA M., SAIJYO F., HIRAI S. *Crawling by body deformation of tensegrity structure robots* // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 2009. – P. 4375–4380.
28. TOKIC M., ERTEL W., FESSLER J. *The crawler, a class room demonstrator for reinforcement learning* // 22nd Int. FLAIRS Conf. 2009. – P. 160–165.
29. TRANSETH A.A., LEINE R.I., GLOCKER C., PETTERSEN K.Y., LILJEBÄCK P. *Snake robot obstacle aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments* // IEEE Trans. Robotics. – 2008. – Vol. 24, No. 1. – P. 88–104.

30. VOROCHAEVA L.YU., MALCHIKOV A.V., YATSUN A.S., MARTINEZ A. *The study of special positions of a crawling robot when changing its configuration* // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 747. – P. 012094.
31. VOROCHAEVA L.YU., PANOVKO G.YA., SAVIN S.I., YATSUN A.S. *Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces* // J. of Machinery Manufacture and Reliability. – 2017. – Vol. 46, No. 6. – P. 527–535.
32. VOROCHAEVA L., SAVIN S., YATSUN A. *An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction* // Russian J. of Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol. 15(4). – P. 623–632.
33. VOROCHAEVA L., YATSUN A., SAVIN S., REPKIN A. *Development of the motion correction system of the crawling robot link on the surface with obstacles* // Proc. 9th Int. Conf. on Physics and Control: Physcon. – 2019. – P. 300–305.
34. VOROCHAEVA L.YU., YATSUN A.S., SAVIN S.I., REPKIN A.V. *Gaits of a search two-link crawling robot* // 30th Int. Scientific and Technological Conf. Extreme Robotics. – 2019. – P. 88–89.
35. WANG Z., GAO Q., ZHAO H. *CPG-inspired locomotion control for a snake robot basing on nonlinear oscillators* // J. of Intelligent & Robotic Systems. – 2017. – Vol. 85, No. 2. – P. 209–227.
36. WANG J., OUYANG W., GAO W., REN Q. *Locomotion control of a serpentine crawling robot inspired by central pattern generators* // IEEE Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conf. – 2017. – P. 414–419.
37. YU J., TAN M., CHEN J., ZHANG J. *A survey on CPG-inspired control models and system implementation* // IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems. – 2013. – Vol. 25, No. 3. – P. 441–456.

INVESTIGATION OF OPERATION OF LINKS LENGTH CONTROL SYSTEM OF THE CRAWLING ROBOT

Lyudmila Vorochaeva, Southwest State University, Kursk, Cand.Sc., assistant professor (mila180888@yandex.ru).

Sergei Savin, Innopolis University, Innopolis, Cand.Sc., Senior Researcher (s.savin@innopolis.ru).

Abstract: The work is devoted to the development of a control system for the movement of a crawling robot when it moves on a horizontal rough surface. This system is a three-level and consists of the following units: gait control, formation of setting influences and control links. The greatest attention is paid to the system of formation of the setting influences, namely the system of correction of lengths of links of the robot entering into it and formation of laws of change of angles of their rotation. Correction of the length of the links may be necessary for the implementation of certain movements, for example, changing the configuration of the device when fixing on the surface of the two extreme supports, which is considered in this work. A sequential three-stage correction algorithm is proposed, in which the length of the central link first varies, then one of the side links and only then the second side link. Each subsequent stage is carried out only if the previous one is insufficient to prevent the robot from falling into special positions, in which there is a loss of all degrees of mobility. The proposed control system structure is built in such a way that, on the one hand, to determine directly the influence of the geometric parameters of the robot to the nature of the resulting motion, and to ease the algorithmic and software implementation of the proposed control law, allowing to implement a control system for extremely simple calculators. The adequacy of the developed control system has been verified by numerical simulation of the robot's motion and charting the correction options depending on the permissible values of elongation / shortening of the links and the initial and final configurations of the object.

Keywords: crawling robot, control system, gait control unit, block formation of setting influences, control unit links, correction system.

УДК 681.5

ББК 30в6

DOI: 10.25728/ubs.2020.85.11

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.

Поступила в редакцию 11.10.2019.

Опубликована 31.05.2020.