

УДК 658.012.011.56

НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО МНОГОЗВЕННОГО РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ*

© 2000 г. А. Г. Блохин, В. Б. Вешников, В. Н. Захаров

Москва, Московский физико-технический институт, Институт проблем механики РАН, ВЦ РАН

Поступила в редакцию 30.05.99 г.

Обсуждаются проблемы управления специальным подклассом автономных мобильных роботов, названных роботами вертикального перемещения. Многозвенная структура и подвижные шарниры, соединяющие звенья, обеспечивают маневренность робота в широких пределах и позволяют ему перемещаться по наклонным и вертикальным поверхностям. Отмечаются особенности движения роботов такого класса и требования к системе управления движением. Предлагаются алгоритмы управления движением, в работе которых используются средства обработки нечеткой информации при формировании управляющих воздействий.

Введение. Мобильные роботы часто используются для доставки каких-либо технических средств и проведения соответствующих операций в местах, затрудненных для проникновения человека или опасных для его жизни [1]. Например, для выполнения операций под водой, в космическом пространстве, на стенах высоких зданий, внутри сложных энергетических установок и т.п. В этом случае эффективно могут быть использованы специальные робототехнические средства, способные к автономному перемещению и выполнению технологических операций в автоматическом режиме. Для передвижения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям в Институте проблем механики Российской академии наук разработан действующий макет мобильного многозвенного робота (ММР) вертикального перемещения. Его конструкция реализуется в виде многозвенной структуры, каждое звено которой разделяется шарнирами, а крайние звенья выполнены в виде опор с элементами обеспечивающими прочное сцепление с поверхностью (рис. 1). Такая конструкция ММР позволяет осуществлять перемещение как по горизонтальным наклонным, так и по вертикальным и по любым другим поверхностям, а также преодолевать определенной высоты и ширины препятствия (трещины, уступы и т.п.), возникающие на пути его движения. Оборудование и приборы при этом могут быть установлены на корпусе какого-либо из звеньев или на опорах робота, а требуемые технологические операции могут выполняться как во время остановки, так и во время движения робота. Конструкция промежуточных частей ММР в виде однотипных звеньев, оканчивающихся шарнирами, позволяет наращивать унифицированную структуру робота для по-

вышения его подвижности, если требуется двигаться в сложной обстановке, например при хаотичном расположении препятствий или внутри трубопровода. Размеры мобильного робота также благодаря этой унификации могут варьироваться в довольно широких пределах в зависимости от его предназначения.

Система управления роботом такого класса должна обладать сложной многоуровневой архитектурой, состоящей из следующих трех крупных слоев: слоя стратегического управления, слоя тактического управления и исполнительного слоя. На уровнях верхнего, стратегического слоя решаются навигационные задачи, связанные с прокладкой маршрута из заданной точки в целевую (в зависимости от постановки задачи любого маршрута, кратчайшего или оптимального по какому-нибудь критерию). Слой тактического управления обеспечивает движение робота по выработанному на уровнях стратегического управления маршруту с учетом обхода возникающих во время движения препятствий. Главная задача этого слоя – обойти препятствие и вернуться на маршрут для продолжения движения к целевой точке. Наконец, уровни исполнительного слоя предназначены для выполнения перемещений в рамках реализации отдельных шагов. Для модели ММР, как будет показано ниже (в отличие от, например, колесных роботов), это довольно сложная задача, учитывая специфику конструкции робота и ту особенность движения, которая состоит в способности ММР перемещаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям.

Данная статья посвящена в основном проблемам организации управления движением робота на исполнительном уровне, т.е. проблемам управления выполнением отдельных шагов при перемещении вверх по вертикальной стене в условиях

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 98-01-01144 и 99-01-00150).

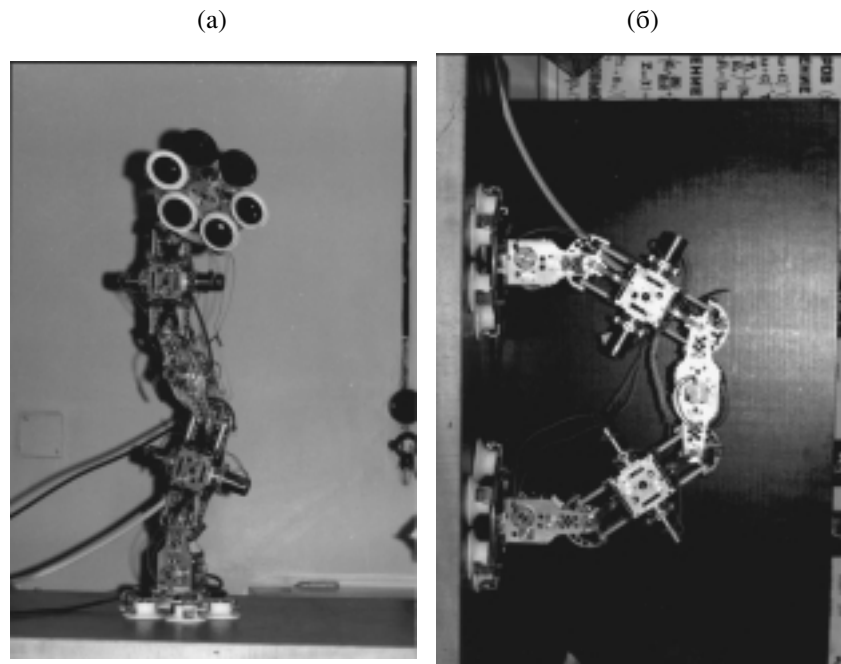


Рис. 1. Фотографии робота на горизонтальной (а) и вертикальной (б) поверхности.

отсутствия каких бы то ни было препятствий. В работе предложенных алгоритмов управления движением используются процедуры обработки нечеткой информации.

1. Механическая модель ММР и особенности ее движения. Рассмотрим схему действующей модели многозвеного мобильного робота (рис. 2), состоящего из трех средних (2–4) и двух крайних звеньев (1, 5), на концах которых находятся платформы 6, снабженные устройствами фиксации с поверхностью 7. Между всеми звеньями находятся системы шарниров 8, выполненные в виде расположенных перпендикулярно одна к другой крупных полушестерен, связанных с шестернями меньшего размера, которые обеспечивают поворот каждого звена посредством двух снабженных редукторами электродвигателей. Электродвигатели и редукторы располагаются на корпусе каждого звена. Общее количество электродвигателей – 8. Конструкция одной пары шарниров обеспечивает наличие двух степеней подвижности в каждом соединении звеньев. Таким образом, число степеней подвижности, с которым может перемещаться в пространстве конечный элемент робота, равно 8.

Устройства фиксации с поверхностью в зависимости от решаемой задачи могут быть выполнены различным образом. В разработанном макете каждая опора фиксируется с поверхностью с помощью вакуумных присосок. Это позволяет роботу прочно удерживаться на вертикальной стене, если суммарный момент не превышает

некоторого заданного значения, что и является основным условием надежного перемещения робота по вертикальной стене. Последовательность выполнения действий при движении такого робота по поверхности состоит в следующем. При включении электродвигателя одной из степеней подвижности какого-либо звена (например, 5 на рис. 2) вращение оси двигателя через редуктор передается на шестерню, связанную с соответствующей полушестерней следующего звена (звено 4). Если в этот момент устройство фиксации 7 платформы 6 не обеспечивает прочное закрепление звена 5 на поверхности, то звено начнет поворачиваться вокруг соответствующей оси. После необходимых включений остальных

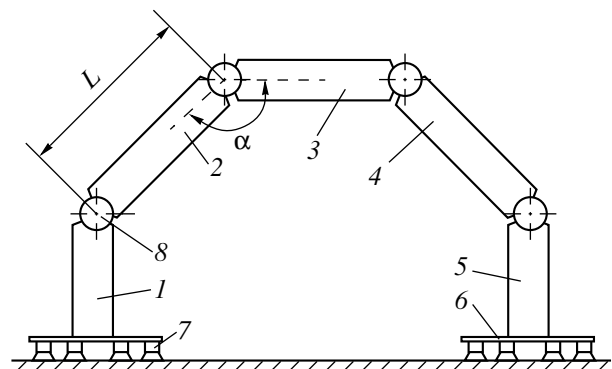


Рис. 2. Схема действующей модели ММР: 1–5 – звенья ММР; 6 – платформа; 7 – устройства фиксации с поверхностью; 8 – системы шарниров.

электродвигателей может быть выполнен перенос опоры 5 в ту или иную точку поверхности, по которой предполагается перемещение робота. После закрепления опоры 5 в новой точке аналогичные действия по переносу могут быть выполнены для опоры 1. Последовательный перенос и закрепление опор ММР позволяет выполнять перемещение всей конструкции робота. При этом могут быть реализованы достаточно сложные движения. Робот может переходить с одной поверхности на другую, которые могут находиться под различными углами в пространстве, а также отделены одна от другой. Могут быть реализованы различные типы походок. Например, относящиеся к плоскому движению типа “перенос через тело” подвижной опоры (подобно акробату, выполняющему “колесо”) и походка типа “движение гусеницы”, или походки, осуществляемые с выводом подвижной опоры из плоскости – антропоморфная (человекоподобная) походка и, как ее частный случай, походка типа “движение циркуля”.

Заметим, что максимальный угол поворота в шарнирах ММР определяется исключительно конструктивными особенностями робота – размерами и прочностью составляющих его узлов и звеньев. Например, для реализованной конструкции робота при длинах средних звеньев 198 мм, крайних звеньев 132 мм, общем весе примерно 100Н и поперечном сечении звена 70×70 мм² максимальный угол поворота в шарнире составил примерно 140° . При таких размерах робот может закрепиться на тонкой плоскости с двух сторон, установив каждую из опор на противоположную сторону плоскости или свести на одной стороне плоскости две опоры вместе.

Информация о положении ММР в текущий момент времени определяется специальными датчиками, измеряющими углы α между соседними звеньями. Эта информация необходима для коррекции движения ММР. Кроме того, во время движения робота измеряются абсолютные углы поворота каждого звена. Зная массы звеньев, нетрудно вычислить для любого положения робота момент каждого звена относительно центра опоры робота M_i , а также суммарный момент всех звеньев M :

$$M = \sum_{i=1}^5 M_i.$$

Два электродвигателя каждого звена обеспечивают требуемую гибкость конструкции. Если один электродвигатель изменяет положение одного звена по отношению к другому в некоторой плоскости, то второй электродвигатель изменяет взаимное расположение звеньев в перпендикулярной плоскости. Эта особенность конструкции и позволяет осуществить приведенные выше типы передвижения.

Пусть перед началом движения опоры ММР зафиксированы на некоторой поверхности. Выберем направление движения робота. При этом конструкция пятизвенника располагается вдоль выбранного направления движения. Каждый тип движения состоит из последовательности повторяющихся действий. Определим его шаг как совокупность действий с момента отрыва опоры от поверхности до ее фиксации на поверхности в другом месте. Сравнивая различные типы плоского движения, нетрудно отметить их характерные особенности.

Первый способ движения ММР состоит в том, что дальняя по ходу движения опора 1 отделяется от поверхности и приближается вплотную к закрепленной опоре 5 (см. рис. 2), затем фиксируется на поверхности. После этого опора 5 отделяется от поверхности и передвигается в направлении движения на максимальное расстояние F от первой опоры и затем фиксируется. Максимальное расстояние F определяется из условия равенства всех углов между всеми звеньями (для пятизвенника – 135°). В результате робот смещается в направлении движения на расстояние F . Этот способ перемещения назовем “движение гусеницы”.

Второй способ принципиально отличается по характеру перемещения опор. Он будет взят за основу в дальнейшем для разработки системы управления движением. Сначала от поверхности отделяется дальняя по ходу движения опора 1 и путем перемещения через опору 5 оказывается впереди нее по ходу движения. Затем опора 1 фиксируется на поверхности на расстоянии F от неподвижной опоры 5. Длина F при таком способе перемещения выбирается из того же условия. Этот способ движения назовем “акробат”.

Необходимо отметить, что расчетная величина F , определяемая без учета размеров платформы, равна $F = L + L\sqrt{2}$ (см. рис. 2). Во втором случае длина шага робота совпадает с расчетной. В первом случае величина шага робота несколько меньше (на величину диаметра платформы). Рассмотрим подробнее задачу управления движением ММР по способу “акробат”.

2. Система управления движением. Отметим две существенные особенности движения ММР способом “акробат” вверх по вертикальной стене.

Во время движения по вертикальной поверхности в точке закрепления опоры, зафиксированной на поверхности, могут возникать сильные перегрузки за счет возникновения момента от веса робота. Суммарный момент M может превысить максимально допустимое значение и может произойти отрыв опоры от поверхности. Отрыв происходит по причине того, что вакуумные присоски могут не выдержать создаваемых перегрузок.

В момент фиксации на поверхности подвижной опоры необходимо, чтобы блок вакуумных

присосок подходил строго перпендикулярно поверхности, на которой происходит фиксация. Дело в том, что при фиксации блок вакуумных присосок должен плотно прилегать к поверхности, что обеспечивается лишь при высокой степени перпендикулярности стыкуемого звена и поверхности.

Задача системы управления состоит в том, чтобы преодолеть эти особенности в движении ММР.

В дальнейшем ММР будет рассматриваться как робот, движущийся способом “акробат” вверх по вертикальной поверхности (см. рис. 1б). Звенья пронумерованы в направлении, противоположном движению (неподвижным является звено 1). Система управления ММР выполняет перенос звена 5 из некоторого положения А, на расстояние, равное начальному F , в положение Б без выхода из плоскости движения.

Сформулируем основное условие системы управления для движения ММР. Пусть M_{\max} – момент, близкий к моменту отрыва звена 1 от вертикальной поверхности. Необходимо перевести звено 5 из положения А в положение Б так, чтобы в любой момент времени суммарный момент $M(t)$ был бы строго меньше M_{\max}

$$M(t) < M_{\max}, \forall t \in [0, T], \quad (2.1)$$

где T – время одного шага движения ММР, $M(t)$ – текущее значение суммарного момента в момент времени t . Поставленная задача достижения цели имеет бесконечное количество решений, и поэтому требуется определить, какое из решений выбрать.

Рассмотрим систему управления в целом. Входными переменными системы управления будут получаемые с датчиков углы между соседними звеньями $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и вычисляемые на их основе моменты каждого звена $M_i, i = 1, \dots, 5$, а выходными переменными системы управления будут номер звена i для осуществления поворота, направление поворота и величина угла $\Delta\alpha_i$ на который необходимо повернуть соответствующее звено.

В начальном положении ММР характеризуется начальными значениями углов $\alpha_i = 135^\circ, i = 1, \dots, 4$, а условием завершения работы системы управления будет достижение заданных конечных значений углов α_{ik} .

При выполнении одного шага ММР способом “акробат” рассматриваются следующие три решаемые последовательно задачи: начального этапа; переходного этапа; заключительного этапа.

Основной задачей системы управления является недопущение суммарных критических моментов при выполнении каждого этапа и поддержка перпендикулярности подвижной опоры при фиксации на поверхности на заключительном этапе. Между этими задачами решено ввести промежуточный этап, в задачу которого входит подготовка конструкции ММР к выполнению заключительного этапа.

Заранее оговоримся, что помимо решения основных задач осуществляются различные проверки, на которых не акцентируется внимание, например: на отсутствие взаимных пересечений звеньев робота, на отсутствие препятствий, на существование поверхности впереди по ходу движения и т.д. Основное внимание уделено внедрению нечетких множеств в алгоритмы управления и создание нечеткой системы управления.

Рассмотрим подробнее задачи каждого этапа.

2.1. Задача начального этапа. Выполнение задачи начального этапа начинается из положения А и заканчивается, когда ММР принимает некоторое промежуточное положение, которое характеризуется тем, что звено 2 достигло конечного положения (без учета угла δ см. п. 2.2), а критические моменты возможного отрыва от поверхности пройдены. Положение звена 2 называется конечным, если для достижения ММР положения Б нет необходимости в относительном изменении положения звена 2 относительно звена 1, т.е. угол α_1 достиг конечного значения α_{1k} .

Опишем нечеткую постановку задачи управления на этом этапе. Измеряем суммарный момент. Если он маленький, то поворачиваем звено 2 так, чтобы уменьшить разность текущего значения угла α_1 и значения угла $\alpha_{1k} = 225^\circ$, которую необходимо достичь для завершения задачи начального этапа. В случае если суммарный момент близок к критическому, то звенья 3, 4 и 5 поворачиваются в сторону, противоположную движению звена 2. Причем их движение происходит следующим образом. Сначала поворачивается звено 3 сильно или слабо в зависимости от того, насколько близко текущее значение момента находится к M_{\max} . Затем поворачивается звено 4 в ту же сторону, но используя новое текущее значение момента. Если он не вышел из критической области, то сильно поворачиваем звено 4, в противном случае звено 4 поворачиваем слабо. Аналогично, в том же направлении поворачивается звено 5.

Заметим следующую особенность такого управления. Все звенья поворачиваются только в одну сторону. Звено 2 поворачивается по направлению движения, увеличивая суммарный момент. Поворотами остальных звеньев ММР пытается скомпенсировать увеличение суммарного момента. При достижении звеном 2 угла α_{1k} завершается задача управления на начальном этапе.

2.2. Задача переходного этапа. Между задачей начального этапа, определяющей движение с суммарным моментом не превышающим заданный, и задачей заключительного этапа, определяющей точную фиксацию опоры на поверхность, необходимо решить задачу по переводу звена 5 из конечного положения задачи начального этапа в положение зависания над будущей точкой фиксации на поверхность, началь-

ного положения для выполнения конечного этапа. Это – задача переходного этапа.

В начальном положении звенья 1 и 2 зафиксированы, и их движение выполняться не будет. Начинается движение со звена 3 по направлению перемещения ММР, если момент не превышает критического. Это движение заканчивается при достижении угла α_2 значения $\alpha_2 = \alpha_{2k} - \delta$, где δ – угол, представляющий собой запас для доворота звена 3 на конечном этапе. Если движение звена 3 не возможно (из-за большого значения суммарного момента), то звенья 4 и 5 поворачиваются против направления перемещения ММР, уменьшая суммарный момент. После поворота звена 3 выполняется поворот звена 4 по направлению движения, а звена 5 – против направления движения. После достижения $\alpha_3 = \alpha_{3k} - \delta$ происходит поворот звена 5 по направлению движения ММР. В конце переходного этапа значения углов будут $\alpha_i = \alpha_{ik} - \delta$, где $i = 2, 3, 4$. Затем звено 5 поворачивается так, чтобы выполнялось условие перпендикулярности звена 5 поверхности.

2.3. Задача заключительного этапа. Заключительный этап начинается из положения, когда звено 5 расположено перпендикулярно поверхности над местом, где оно будет зафиксировано на поверхности. Заключительный этап завершается при достижении ММР положения Б.

Идея алгоритма состоит в том, чтобы поворачивать больше то из звеньев 3 или 4, которое сильнее отклонено от конечного состояния α_{2k} , α_{3k} . При этом звено 5 поворачивается таким образом, чтобы соблюдалось условие перпендикулярности стене.

3. База нечетких правил. В данной системе для представления специальных знаний, используемых для нечеткого вывода, применены нечеткие правила. Основная часть нечетких правил объединяется в блоки, образуя иерархическую систему. Полная система нечетких правил имеет вид

Блок $\mathbf{R}_{1,1} = \{R_{1,1,1}, R_{1,1,2}\}$ (поворот звена 2):

$R_{1,1,1}$: если M маленький, то сильно поворачиваем звено 2, увеличивая M ,

$R_{1,1,2}$: если M большой, то слабо поворачиваем звено 2, увеличивая M .

Блок $\mathbf{R}_{1,2} = \{R_{1,2,1}, R_{1,2,2}\}$ (поворот звена 5):

$R_{1,2,1}$: если M_5 большой, то сильно поворачиваем звено 5, уменьшая M ,

$R_{1,2,2}$: если M_5 маленький, то слабо поворачиваем звено 5, уменьшая M .

Блок $\mathbf{R}_{1,3} = \{R_{1,3,1}, R_{1,3,2}\}$ (поворот звена 4):

$R_{1,3,1}$: если $M_5 + M_4$ большой, то сильно поворачиваем звено 4, уменьшая M ,

$R_{1,3,2}$: если $M_5 + M_4$ маленький, то слабо поворачиваем звено 4, уменьшая M .

Блок $\mathbf{R}_{1,4} = \{R_{1,4,1}, R_{1,4,2}\}$ (поворот звена 3):

$R_{1,4,1}$: если $M_5 + M_4 + M_3$ большой, то сильно поворачиваем звено 3, уменьшая M ,

$R_{1,4,2}$: если $M_5 + M_4 + M_3$ маленький, то слабо поворачиваем звено 3, уменьшая M .

Блок $\mathbf{R}_{2,1} = \{R_{2,1,1}, R_{2,1,2}\}$ (поворот звена 2):

$R_{2,1,1}$: если M большой, то сильно поворачиваем звено 2, уменьшая M ,

$R_{2,1,2}$: если M маленький, то сильно поворачиваем звено 2, увеличивая M .

Блок $\mathbf{R}_{2,2} = \{R_{2,2,1}, R_{2,2,2}\}$ (поворот звена 3):

$R_{2,2,1}$: если α_2 большой, то сильно поворачиваем звено 3, уменьшая M ,

$R_{2,2,2}$: если α_2 маленький, то слабо поворачиваем звено 3, уменьшая M .

Блок $\mathbf{R}_{2,3} = \{R_{2,3,1}, R_{2,3,2}\}$ (поворот звена 4):

$R_{2,3,1}$: если α_3 большой, то сильно поворачиваем звено 4, уменьшая M ,

$R_{2,3,2}$: если α_3 маленький, то слабо поворачиваем звено 4, уменьшая M .

Блок $\mathbf{R}_{2,4} = \{R_{2,4,1}, R_{2,4,2}\}$ (поворот звена 5):

$R_{2,4,1}$: если M большой, то сильно поворачиваем звено 5, уменьшая M ,

$R_{2,4,2}$: если M маленький, то сильно поворачиваем звено 5, увеличивая M .

Блок $\mathbf{R}_{3,1} = \{R_{3,1,1}, R_{3,1,2}\}$ (поворот звена 3):

$R_{3,1,1}$: если α_2 большой, то сильно поворачиваем звено 3, увеличивая M ,

$R_{3,1,2}$: если α_2 маленький, то слабо поворачиваем звено 3, увеличивая M .

Блок $\mathbf{R}_{3,2} = \{R_{3,2,1}, R_{3,2,2}\}$ (поворот звена 4):

$R_{3,2,1}$: если α_3 большой, то сильно поворачиваем звено 4, соблюдая перпендикулярность,

$R_{3,2,2}$: если α_3 маленький, то слабо поворачиваем звено 4, соблюдая перпендикулярность.

Здесь $R_{i,j,k}$ – нечеткие правила, i – номер этапа, j – номер блока правил, k – номер правила. Отметим характерную особенность устройства базы нечетких правил. Все правила объединены парами. В случае, если необходимо повернуть любое звено, оно может быть повернуто в большей или меньшей степени в зависимости от степени близости к M_{\max} (кроме блоков $R_{2,1}$ и $R_{2,4}$). Это и отражено в блоках правил. В блоках правил $R_{2,1}$ и $R_{2,4}$, поворот звеньев 2 и 5 соответственно выполняется в разные стороны.

4. Реализация управления. 4.1. Начальный этап. Экспертное управление на этом этапе состоит в том, чтобы поворачивать звено 2 в сторону достижения конечного значения угла α_{1k} при условии достаточно малого суммарного момента $M(t)$. Если звено 2 повернуть не возможно, в силу ограничения $M(t) < M_{\max}$, то звенья 3–5 поворачиваются так, чтобы уменьшить момент этих звеньев относительно точки опоры (звена 1). В результате структура управления на начальном

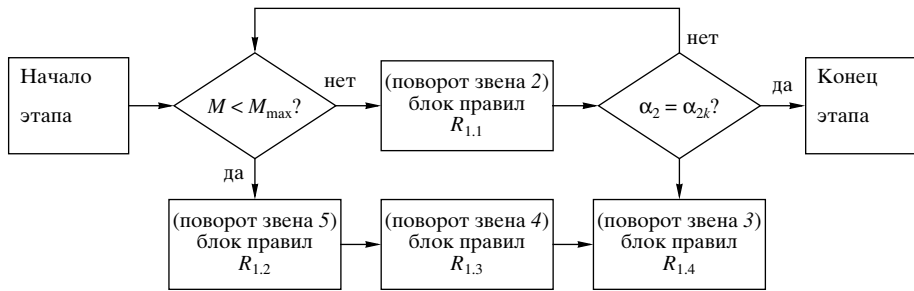


Рис. 3. Управление на начальном этапе.

этапе состоит из четырех блоков (рис. 3), а значит, база нечетких правил начального этапа может быть условно разделена на четыре блока. Результатом вывода в каждом блоке будет поворот соответствующего звена. Блоки правил разделены условиями их применимости, в связи с этим снимается вопрос противоречивости используемых знаний.

Необходимая входная переменная для блока $R_{1.1}$ будет суммарный момент M , а выходная переменная $\Delta\alpha_1$ – относительный угол поворота звена 2.

Необходимая входная переменная для блока $R_{1.2}$ – момент пятого звена M_5 , а выходная переменная α_4 – относительный угол поворота звена 5. Аналогично устроены блоки $R_{1.3}$, $R_{1.4}$. Звенья, соответствующие этим блокам, выполняют уменьшение суммарного момента, поэтому нет необходимости в знании суммарного момента, а изменение угла производится пропорционально тому моменту, который изменяется при вращении соответствующего звена. Например, изменение угла α_2 влияет на изменение моментов M_3 , M_4 , M_5 . Поэтому база нечетких правил использует $M_3 + M_4 + M_5$.

Переход к блокам $R_{1.2}$, $R_{1.3}$, $R_{1.4}$ осуществляется по условиям системы управления при решении задачи данного этапа. Вопрос о том, в какую сторону поворачивать звено, по часовой стрелке или против часовой стрелки, составляет вторую задачу системы управления и решается следующим образом. Моделируется поворот как в одну, так и в другую сторону. Затем вычисляются и сравниваются соответствующие новым положениям моменты M . На основе того из моментов, который больше удовлетворяет решаемой в данный момент задаче, строится управляющее воздействие. Например, поворачивая звено 3 в этой задаче нам необходимо уменьшить суммарный момент. Это и будет условием поворота.

4.2. П е р е х о д н ы й э т а п. Теперь рассмотрим реализацию переходного этапа. В его задачу входит расположение звеньев так, чтобы звено 5 было перпендикулярно стене. При этом поворот любого звена не должен сопровождаться выходом максимального допустимого момента за уро-

вень M_{max} . Структура управления реализована в виде четырех блоков нечетких правил (рис. 4).

Блок $R_{2.1} = \{R_{2.1.1}, R_{2.1.2}\}$ для поворота звена два имеет вид:

$R_{2.1.1}$: если M большой, то сильно поворачиваем звено 2, уменьшая M

$R_{2.1.2}$: если M маленький, то сильно поворачиваем звено 2, уменьшая M

Этот блок необходим, так как при поворотах звеньев 3–5 может возникнуть выход текущего значения момента в область критических моментов. В этом случае звено 2 поворачивается так, чтобы скомпенсировать движение остальных звеньев. Таким образом наблюдается ситуация, обратная к той, что возникала при решении задачи начального этапа. Как всегда, используется не одно правило, а блок из двух правил.

Затем последовательно поворачиваются звенья 3–5, как и на начальном этапе, но увеличивая суммарный момент M . Здесь используется дополнительная проверка на условие достижения звеном конечного угла.

Условие окончания – это достижение звеньями 3–5 конечных углов α_{2k} , α_{3k} , α_{4k} соответственно. После окончания работы алгоритма управления выравнивается положение звена 2 и проверяется постижение перпендикулярности звена 5 к поверхности.

4.3. З а к л ю ч и т е л ь н ы й э т а п. Рассмотрим заключительный этап и его реализацию в виде базы нечетких правил. В управлении на заключительном этапе звенья 1 и 2 не участвуют, так как звено 2 уже достигло конечного значения. Напомним, что цель управления на этом этапе – выдерживать перпендикулярность звена 5 к поверхности. Структура управления изображена на рис. 5.

Происходит поворот того звена, которому дольше поворачиваться для достижения им конечного состояния. Блок $R_{3.1}$ представляет собой два правила, одно из них – для поворота, когда угол большой, и другое – для поворота, когда угол маленький.

Блок $R_{3.2} = \{R_{3.2.1}, R_{3.2.2}\}$ работает несколько сложнее. В зависимости от того, какое правило

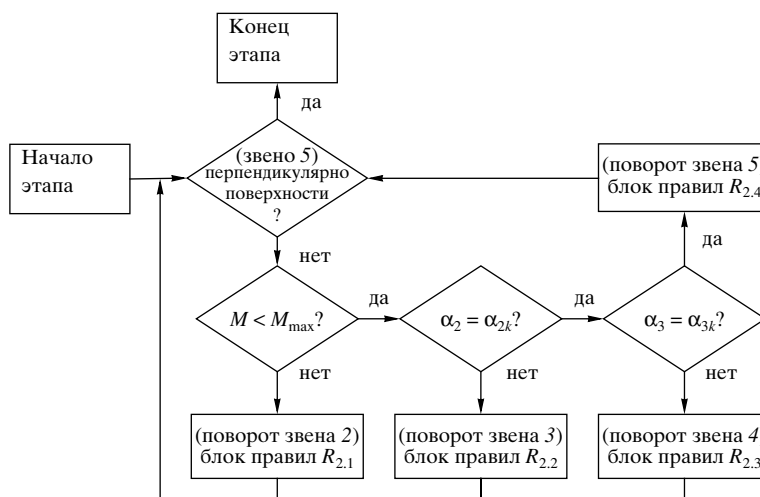


Рис. 4. Управление на переходном этапе.

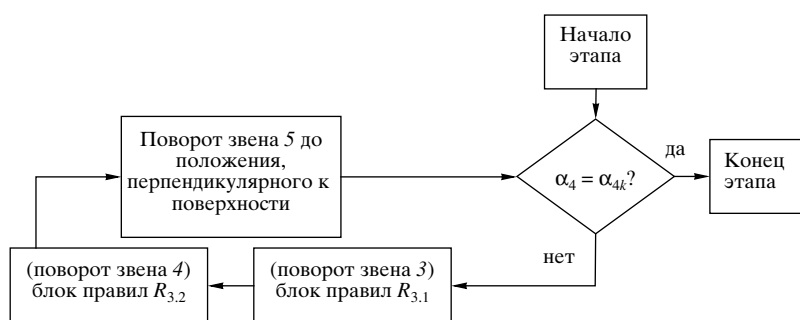


Рис. 5. Управление на заключительном этапе.

использовалось для поворота звена 3, выбирается правило для поворота звена 4. Если использовалось, что α_2 большой, в блоке $R_{3,2}$ выбирается правило, где α_3 маленький и наоборот. Это необходимо для согласованного движения звеньев 3 и 4. Сначала сильно поворачивается звено 3, затем слабее поворачивается звено 4 или наоборот.

После поворота обоих звеньев вычисляется угол поворота α_4 звена 5. Заметим, что поворот звена 5 осуществляется без использования базы нечетких правил. Условием окончания заключительного этапа, а значит и шага ММР будет, когда звено 5 достигает поверхности, при этом угол $\alpha_4 = \alpha_{4k}$.

5. Формирование нечетких множеств. В рассматриваемой системе нечеткого управления в качестве способа представления профессиональных знаний использовались нечеткие правила, а в качестве представления нечеткостей – понятия теории нечетких множеств.

Ниже описан способ формирования нечетких множеств, используемых в данной системе. Рассмотрим базу нечетких правил. Для характеристики момента используется две лингвистические переменные “маленький” и “большой”. Заметим, что значение момента “маленький” для звена 2 и

значение момента “маленький” для звена 5 должны описываться разными нечеткими множествами. Это связано с тем, что на звено 5 и на звено 2, во-первых, наложены разные нагрузки, а во-вторых, поворот звена 5 дает менее резкое изменение суммарного момента, чем поворот звена 2. Поэтому для описания лингвистических переменных используется восемь (четыре звена \times две лингвистические переменные) нечетких множеств. Звено 1 в движении не участвует.

Во-первых, каждое нечеткое множество должно быть определено на всем универсальном множестве. Это необходимо для того, чтобы по правилу всегда можно было получить экспертное заключение. Во-вторых, исходя из того, что правила образуют блоки, то нечеткие множества в каждом блоке являются симметричными. Зная вид нечеткого множества “маленький”, нечеткое множество “большой” определяется отображением нечеткого множества “маленький” относительно центра универсального множества.

На рис. 6 показаны нечеткие множества моментов звеньев 2–5, которые получены путем аппроксимации лингвистической переменной “маленький” в виде кусочно-линейной функции.

Общий принцип задания вида нечетких множеств состоит в следующем. Нечеткие множества звеньев, движение которых вызывает наиболее резкие скачки на графике суммарного момента, должны иметь более низкий уровень нечеткости для одних и тех же значений входной переменной. Графики этих нечетких множеств как бы сильнее “прижимаются” к оси универсального множества.

В качестве характеристики угла поворота в НСУ используются две лингвистические переменные “сильно” и “слабо”. При моделировании движения ММР выяснено, что вид используемых нечетких множеств не отражается на качестве управления. Поэтому для каждого звена используются одинаковые нечеткие множества. Разделение есть лишь на нечеткое множество, характеризующее лингвистическую переменную “большой” и “маленький”. На рис. 7 приведены используемые при управлении нечеткие множества.

В качестве метода нечеткого вывода взят простой нечеткий вывод. Кусочно-линейное представление нечетких множеств использовалось для упрощения имеющихся в нем формул. Преимуществами простого нечеткого вывода является простота и способность работать с блоком нечетких правил.

6. Простой нечеткий вывод. Задана база нечетких правил $A_i \Rightarrow B_i$, где $i = 1, \dots, n$, причем нечеткие множества A_i и B_i считаются заданными. Также, пусть задана входная переменная системы управления как число $\alpha \in U(A_i)$, где $U(A_i)$ – универсальное множество условия. Необходимо найти значение $\beta \in U(B_i)$, где $U(B_i)$ – универсальное множество следствия. Схему нечеткого вывода можно представить в следующем виде [2–3]:

(Условие) \Rightarrow (Следствие):	$A_i \Rightarrow B_i$
Посылка	α_1
Заключение	β_1 .

Заметим, что условие нечеткого правила может содержать несколько нечетких множеств, разделенных логическими связками типа И/ИЛИ. Опишем формально простой нечеткий вывод на примере следующей задачи

Задача. Пусть нечеткая система управления состоит из входной переменной α , выходной переменной β и базы знаний Π . База знаний задачи по управлению задана в виде двух правил $\Pi = \{P_1, P_2\}$

- P_1 : если A_1 , то B_1
- P_2 : если A_2 , то B_2

Или $\Pi = \{A_1 \Rightarrow B_1, A_2 \Rightarrow B_2\}$, где A_1, A_2 – заданные нечеткие множества, описывающие входную переменную α , а B_1, B_2 – заданные нечеткие множества, описывающие выходную переменную β . Например, входная переменная α – угол, а нечет-

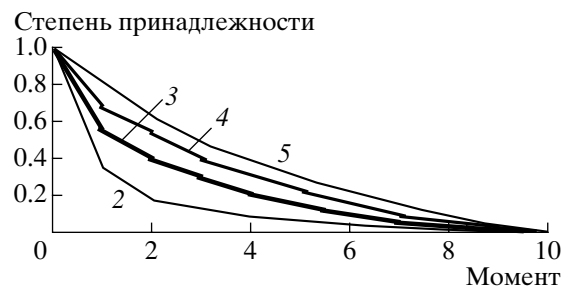


Рис. 6. Нечеткие множества моментов каждого звена: 2–5 – номера звеньев.



Рис. 7. Нечеткие множества угла поворота: 1 – маленький, 2 – большой.

кие множества значения его описывающие есть $A_1 = \text{“большой”}$ и $A_2 = \text{“маленький”}$.

Пусть значение входной переменной равно α_1 . Необходимо определить значение выходной переменной β_1 .

Решение. Возьмем первое правило $A_1 \Rightarrow B_1$ (см. рис. 8). По значению входной переменной α_1 определяется z_1 – уровень нечеткости системы управления. Он характеризует то, на сколько следует доверять результатам, полученным в нашей системе управления. Для малых значений z_1 управляющее воздействие, полученное на основе этого нечеткого вывода, отвергается.

Значение выходной переменной β_1 находится с использованием нечеткого правила $A_1 \Rightarrow B_1$, в частности нечеткого множества B_1 . График нечеткого множества B_1 считается заданным, вопрос лишь в том, как по нему получить значение выходной переменной β_1 . Число z – степень принадлежности нечеткому множеству A_1 , показывает, на сколько можно доверять тому, что α_1 принадлежит A_1 . Степень доверия A_1 и B_1 одинаковая, так как они составляют одно нечеткое правило. Поэтому β_1 вычисляется из условия

$$z_i = B_i(\beta_i),$$

где $i = 1$ – номер правила, использованного для вычисления z_i .

Для двух нечетких правил уровень нечеткости вычисляется по правилу

$$z = \max_i (A_i(\alpha_1)).$$

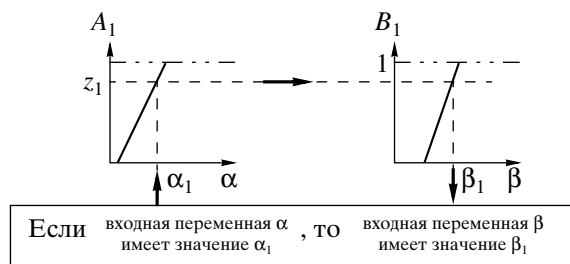


Рис. 8. Простой нечеткий вывод.

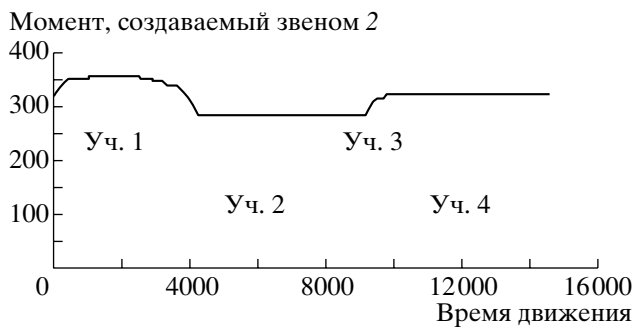


Рис. 9. Момент, создаваемый вторым звеном.

Графически откладывается значение α_1 на каждом из графиков нечетких множеств A_1 и A_2 . Пусть степень принадлежности нечеткому множеству $A_1 - z_1$, больше чем степень принадлежности нечеткому множеству $A_2 - z_2$. Найдя z , делается важное заключение – α_1 принадлежит нечеткому множеству A_1 . Из этого следует, что используемое правило – это P_1 .

Графически это означает, что именно степень принадлежности z_1 откладывается на оси ординат графика нечеткого множества B_1 (рис. 8). Полученное значение β_1 есть ответ задачи.

7. Результаты моделирования. Алгоритм движения “акробат” был реализован на языке программирования C++.. На этапе моделирования был получен график изменения суммарного момента и изменения моментов каждого звена при перемещении робота по вертикальной поверхности.

Рассмотрим связь наблюдаемого перемещения и используемых для его организации правил. На графиках изменения моментов по оси абсцисс отложено время движения ММР во внутрисистемных единицах, а по оси ординат – внутрисистемные единицы момента, соответствующие данному времени.

Момент от веса каждого звена измеряется относительно основания первого звена I , которое не участвует в движении, а поэтому его момент остается постоянным. Следует заметить, что начальное значение момента на всех рассматриваемых графиках совпадает с последним значением

на том же графике. Это связано с симметрией конструкции ММР

На рис. 9 показано изменение момента для звена 2 во время движения ММР. На графике можно выделить четыре участка. На втором и четвертом участках момент постоянен, а на участках один и три момент претерпевает изменения. Деление на эти участки будет использоваться и для объяснения графиков моментов остальных звеньев. Сначала на первом участке звено 2 поворачивается в шарнире относительно звена I . На графике изображение меняющегося момента напоминает полукруг. На этом участке в алгоритме используются, в основном, правила для поворота звена 2:

$R_{1.1.1}$: если M маленький то сильно поворачиваем звено 2.

При использовании только этого правила на графике момента мы получили бы изображение в виде полукруга. При увеличении суммарного момента использование одного этого правила не допустимо, так как при этом резко возрастает суммарный момент в критической области. Поэтому используются другие правила, чем и объясняется более пологий, чем у круга, участок возрастания и убывания момента звена 2.

После того как звено 2 достигает своего конечного положения, оно в дальнейшем движении не участвует (за исключением короткого этапа три). На первом участке звено 2 намеренно смещается ближе к опоре с целью уменьшить суммарный момент. Это необходимо для плавного движения остальных звеньев. Когда же значение суммарного момента покидает критическую область, мы возвращаем звено 2 в конечное положение.

На графике изменения момента от веса звена 3 (рис. 10) наблюдается влияние изменения момента от веса звена 2. Это, во-первых, характерный участок (подобие полукруга), соответствующий первому этапу для звена 2. На нем имеется пилообразный участок. Это соответствует попытке скомпенсировать путем движения звена 3, увеличение момента от звена 2. Однако этого оказывается не достаточно. Поэтому компенсация увеличения момента от движения звена 2 будет осуществляться также за счет уменьшения моментов при движении звеньев 4 и 5.

На следующем фрагменте графика можно заметить участок поворота звена 3. Примерное соответствие данного участка четверти круга есть следствие использования одного правила:

$R_{2.2.2}$: если α_2 маленький то слабо поворачиваем звено 3, уменьшая M .

После этого звено 3 в движении не участвует, что соответствует участку с постоянным моментом. Этот участок соответствует движению звена 2 (перемещения звена 3 относительно звена 2 не происходит). Лишь в конце третьего этапа можно

видеть небольшой участок, на котором звено 3 участвует в выполнении задачи выравнивания звена 5 перпендикулярно поверхности движения.

Наконец, последний, четвертый участок довольно прост в интерпретации. Общая задача третьего этапа – движение с сохранением перпендикулярности к поверхности звена 5. Уровень момента близок к конечному (самая крайняя точка графика). Поэтому сначала момент от звена 3 остается постоянным, а движутся звенья 4 и 5, у которых больше разность между текущим и конечным моментами. Лишь в самом конце происходит плавное уменьшение момента до конечного значения.

На первом участке (рис. 11) видны характерные пилообразные изменения момента от звена 4. Не следует забывать, что здесь сказываются изменения положений предыдущих звеньев. Но основной вклад в вид графика вносят правила для движения звеньев 4 и 2.

$R_{1.1.1}$: если M большой то слабо поворачиваем звено 2;

$R_{1.3.1}$: если $M_5 + M_4$ большой то сильно поворачиваем звено 4, уменьшая M .

При этом правило $R_{1.1.2}$ увеличивает момент, а правило $R_{1.3.2}$ его уменьшает. Это и соответствует пилообразной части графика изменения момента от звена 4. Можно заметить более тонкие детали этой части графика. Каждый пик пилообразного участка состоит из резкого и не продолжительного подъема и пологого, довольно медленного спуска. Дело в том, что звено 2 несет большую нагрузку и расположено ближе к неподвижной опоре, от которой измеряется момент. Поэтому поворот на один и тот же угол положения звена 2 вносит больший вклад в изменение момента, чем поворот звена 4.

На втором участке можно выделить два полукруга. Первый из них соответствует повороту звена 3, что мы уже наблюдали на графике изменения момента от звена 3. Второй полукруг соответствует движению звена 4 по правилу:

$R_{1.3.1}$: если $M_5 + M_4$ большой то сильно поворачиваем звено 4, уменьшая M .

На участке три заметно резкое возрастание момента, которое вызвано поворотом звена 2. В конце этого участка появляются пилообразные изменения момента (см. два зубца на графике) Дело в том, что суммарный момент подошел к критической области и возрастание момента за счет поворота звена 2 система управления пытается скомпенсировать уменьшением момента за счет поворота звена 4. Если этого не достаточно, необходимо уменьшить суммарный момент за счет других звеньев.

Участок с постоянным уровнем момента соответствует задаче поддержания перпендикулярности звена 5 к поверхности. Уменьшение момента

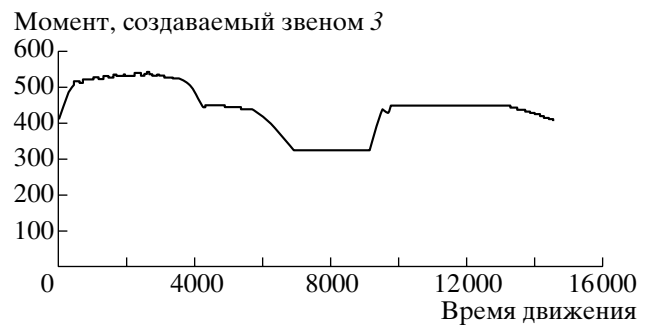


Рис. 10. Момент, создаваемый третьим звеном.



Рис. 11. Момент, создаваемый четвертым звеном.

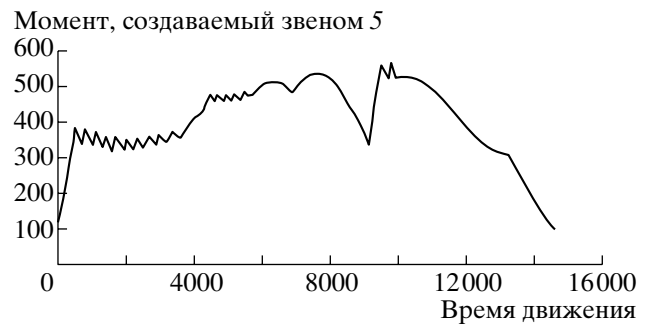


Рис. 12. Момент, создаваемый пятым звеном.

есть результат выполнения алгоритма постановки на опору.

График изменения момента от звена 5 на рис. 12 имеет довольно сложный вид. Это связано как с тем, что на его вид оказывают влияние движение всех остальных звеньев, так и с тем, что собственное движение звена 5 может резко менять уровень момента.

Теперь проследим за изменением суммарного момента. В начале резкое увеличение момента связано с движением звена 2. Затем наблюдается пилообразный участок. Он компенсирует движение звена 2 в критической области (рис. 12). Пилообразность кривой связана с тем, что в компенсации увеличения момента от звена 2 участвуют

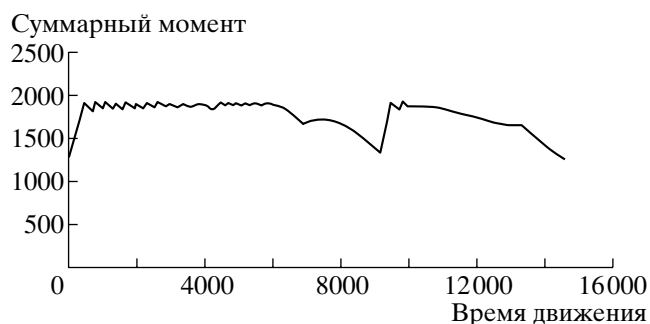


Рис. 13. Суммарный момент относительно неподвижной опоры.

кроме звена 5 еще звенья 3 и 4. Причем изображенный полукруг симметричен полукругу графика изменения момента для звена 2. На следующем участке графика суммарного момента оба полукруга компенсируются, и в результате мы наблюдаем постоянный уровень суммарного момента.

В начале второго этапа происходит движение звена 3. Сначала в не критической области, а затем в критической ему соответствует уже знакомое нам пилообразное изменение момента. Далее две волны соответствуют двум последовательным движениям звеньев 3 и 4.

Заметим, что на конечном этапе работы алгоритма перемещения ММР происходит одновременное движение всех трех звеньев (звеньев 3, 4 и 5). Это следует из того, что углы наклона каждого графика различные. Стоит обратить внимание на поворот звена 5 на переходном этапе. Вид кривой поворота говорит о том, что для движения использовалось одно правило. График не имеет вид полукруга, как график поворота звена 2 на начальном этапе. Это происходит потому, что во время движения звено 5 поворачивается на угол больший чем 90° .

Масштаб графика на рис. 13 выбран, исходя из суммы значений предыдущих графиков. График суммарного момента может разъяснить многие нюансы, остающиеся загадкой на предыдущих графиках. Значение суммарного момента, равное 1900, есть предел, за который выходить нельзя. При этом указанное значение не равно в точности моменту, при котором происходит отрыв конструкции от поверхности. Реально значение 1900 взято так, чтобы даже выход за его пределы не создавал значительных напряжений в неподвижной опоре.

На графике суммарного момента пилообразные участки соответствуют частой смене работы нечетких правил, по которым происходит вывод. Участки с плавными траекториями представляют собой управление в рамках одной пары правил без резких изменений и переходов от движения одного звена к другому звену.

Вид графиков моментов зависит от способа задания нечетких множеств посылки и заключения. Грубая аппроксимация нечеткого множества заключения влияет на смещение графика суммарного момента в область более низких значений, а грубая аппроксимация нечеткого множества посылки приближает суммарный момент к значениям критических моментов.

Из этого следует основной вывод: нужно более тщательно подбирать значения функций принадлежности antecedентов нечетких правил. Общий принцип задания вида нечетких множеств состоит в следующем. Нечеткие множества моментов звеньев, движение которых вызывает наиболее резкие скачки на графике суммарного момента, должны иметь более низкие значения функций принадлежности для входных переменных. Графики этих нечетких множеств как бы сильнее “прижимаются” к оси универсального множества.

Кроме перечисленных выше основных задач каждого этапа в процессе перемещения ММР решаются также задачи прогнозирования поведения системы. В работе системы управления ММР моделируется два возможных метода движения и сравниваются по тому, на сколько система более четко следует исполняемому алгоритму управления и приближается к цели управления.

Заключение. Дальнейшим направлением исследований в этой области может быть реализация предложенных методов управления для роботов с нагруженными звеньями, а также исследование возможностей повышения мобильности ММР за счет, например, выбора других типов движений.

Процесс решения задачи управления движением ММР делится на этапы. Решение задачи каждого этапа представляет собой последовательность нечетких выводов с использованием фрагментов баз нечетких правил. Особое внимание следует уделять условиям переходов к решению следующей очередной задачи перемещения. Задачи оптимального управления в данной работе не рассматривались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galt S., Luk B.L., Chen S. et al. Intelligent walking gait generation for legged robots // The 2nd Internat. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 99). September 13, 1999.
2. Блохин А.Г. Нечеткий вывод использующий преобразование функций принадлежности // Изв. РАН. ТиСУ. 1997. № 5.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Поспелова Д.А. М.: Науча, 1986.