

МОБИЛЬНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С РОБОТАМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Ульянов Сергей Викторович

Доктор физико-математических наук, профессор;

PronetLabs;

117403 Москва ул. Булатниковская, 20, стр. 3

e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

В статье приводятся результаты исследований, относящихся к проблеме создания мобильных систем с роботами вертикального перемещения. Рассматриваются способы реализации перемещения роботов по вертикальным поверхностям, преимущества и недостатки каждого способа. Представлены результаты моделирования ориентации и передвижения транспортного модуля робота вертикального перемещения. В качестве математического аппарата для моделирования используется теория нечетких моделей. Дается анализ механической системы робота вертикального перемещения для выполнения различных технологических задач. В качестве примеров технологических задач рассматриваются операции очистки, покраски, резки и инспекции. Приводятся схемы роботов, обеспечивающие переход с одной поверхности на другую. Представлены результаты исследований захватных устройств роботов вертикального перемещения.

Ключевые слова: модель нечеткого регулятора, структура интеллектуальной системы управления, база знаний.

MOBILE INTELLIGENT SYSTEMS WITH WALK CLIMBING ROBOTS

Uyanov Sergey

Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

PronetLabs;

117403, Moscow, Bulatnikovskaya str., 20-3;

e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

This paper concerns the study of the problem of fabricating mobile systems having vertical displacement robots. Methods of facilitating robot motion along vertical surfaces, and the advantages and drawbacks of each method are examined. Results are given of modelling the orientation and locomotion of the transport module of a vertically mobile robot. Fuzzy model theory is used as the mathematical apparatus for modelling. An analysis is given of the mechanical system of the vertically mobile robot for a variety of industrial applications – cleaning, painting, cutting, and inspection operations are considered as possible industrial applications. Robot designs that permit moving from one surface to another are given. Results are also provided from research on grippers used in vertically-mobile robots.

Keywords: fuzzy controller model, structure of intelligent control systems, knowledge base.

Введение

Последние несколько лет в развитых странах мира ведутся интенсивные исследования, направленные на создание мобильных телеуправляемых или дистанционно-управляемых роботов, которые могут перемещаться по горизонтальным, наклонным или вертикальным поверхностям. Такие работы должны быть способны преодолевать либо обходить препятствия, встречающиеся на пути их следования, выходить в необходимую начальную (стартовую) позицию, подготовиться к выполнению требуемых технологических операций и осуществить их выполнение [1-4]. Необходимость создания таких роботов и робототехнических комплексов обуславливается возникающими экстремальными ситуациями, возросшими требованиями выполнения технологических операций и создающимися усло-

виями, в которых человеку опасно находиться или сложно выполнять действия самому. Экстремальные условия и среды могут отличаться повышенной радиоактивностью, высокими температурами, загазованностью и т. п. Например, необходимо выполнять дезактивацию помещений, включая стены и потолки, производить аварийные работы на атомных электростанциях, выполнять противопожарные операции, осуществлять строительные-монтажные, покрасочные работы на высоте при строительстве различных сооружений, проведении ремонтных работ на корпусах судов в доках и многое другое [5-9].

В ряде случаев достаточно использовать мобильные роботы горизонтального или вертикального перемещения. Однако часто возникают задачи, например, такие, как дезактивация помещений, когда автоматическое средство должно обладать повышенной мобильностью и выполнять необходимые технологические операции при движении как по горизонтальным, так и по вертикальным поверхностям, а также по потолкам.

Исследования и разработки роботов повышенной мобильности, в том числе роботов вертикального перемещения (РВИ), интенсивно ведутся на протяжении последних десяти лет в Японии, СССР, США, Англии, Франции и других странах в соответствии с национальными и международными программами. В качестве захватных устройств для сцепления с вертикальными поверхностями и потолками используются вакуумные устройства универсального применения (не зависящие от материала поверхности), а также управляемые магнитные захватные устройства, предназначенные для сцепления роботов с поверхностями из ферромагнитных материалов [10-14].

Существенные результаты с промышленным применением роботов вертикального перемещения достигли такие зарубежные фирмы, как «Токио Газ Лимитед», «Хитачи» (Япония), «Интернейшинл роботик технолоджи» (США), Портсмутский политехник (Великобритания) и другие. Как показала проведенная в сентябре 1990 г. в г. Глазго (Великобритания) Первая международная Олимпиада роботов [15], достижения нашей страны в данной области находятся на уровне, соответствующем мировым образцам – два робота вертикального перемещения Института проблем механики АН СССР получили медали этой Олимпиады.

Дальнейшее развитие этого нового направления в робототехнике потребовало выполнения исследований, направленных на повышение мобильности и маневренности роботов, улучшение их интеллектуальных свойств, расширение технологических возможностей и областей эффективного использования.

Повышение мобильности и маневренности может достигаться за счет обеспечения перехода роботов при движении с пола на стены, со стены на потолок и т. д. Эта проблема весьма сложна, и в настоящее время имеются определенные достижения, требующие, однако, своего дальнейшего развития. Одним из методов, обеспечивающих необходимое повышение мобильности, является установка робота вертикального перемещения на мобильном роботе-носителе (тележке или танкетке), способном передвигаться по горизонтальным поверхностям. Присоединение робота вертикального перемещения к вертикальным поверхностям осуществляется в автоматическом режиме по соответствующим командам управления.

Повышение интеллектуальных качеств такого комплекса достигается постановкой соответствующих датчиков (локационных, ультразвуковых, тактильных, технического зрения и др.), организацией обратных связей, разработкой специальных алгоритмов анализа сцен, накопления баз данных о внешней среде и автоматического принятия решений. Существенными преимуществами, обеспечивающими перспективное развитие указанных комплексов, является возможность их использования в таких рабочих средах и экстремальных условиях, в которых опасно или затруднено присутствие людей (повышенная радиация, высокие температуры, наличие токсичных или ядовитых газов, большие высоты, на которых необходимо выполнять технологические операции, а также другие экстремальные ситуации).

В данной статье приводятся результаты части исследований, относящихся к проблеме созданию мобильных роботов вертикального перемещения, а именно: реализация механических перемещений по вертикальным поверхностям различными методами, моделирование движения, исследование маневренности и проходимости, анализ механических систем для эффективного выполнения различных технологических операций, в том числе при переходе с одной поверхности на другую под прямым углом, исследование и разработка вакуумных захватных устройств.

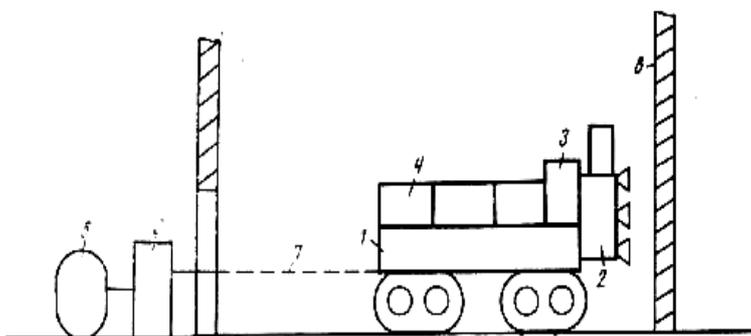


Рис. 1. Робототехнический комплекс повышенной мобильности: 1 – робот горизонтального перемещения; 2 – робот вертикального перемещения с технологическим оборудованием; 3 – блок сопряжения роботов вертикального и горизонтального перемещения; 4 – блок питания; 5 – оператор; 6 – пульт управления; 7 – канал управления; 8 – поверхность обработки

Для повышения маневренности и расширения выполняемых функций в созданный мобильный робототехнический комплекс включены автоматически управляемый робот горизонтального перемещения, установленный на нем робот вертикального перемещения, манипулятор для сцепления робота вертикального перемещения с поверхностью (рис. 1). Управление комплексом может осуществляться от единого пульта, в автономном, в супервизорном или в автоматическом режимах. Пульт управления находится в отдельном помещении на безопасном расстоянии от места выполнения работ роботом в некоторой экстремальной среде.

1. Способы реализации перемещения РВП по вертикальным поверхностям

Принципиально реализация механического перемещения транспортного модуля по вертикальной поверхности может быть осуществлена следующими способами.

Первый способ – шаговый дискретный. Он предполагает дискретные перемещения платформы робота на заданный шаг, в интервале между которыми происходит фиксация одной группы захватных устройств и освобождение другой группы. Подвидами этого способа являются шаговый дискретный способ с нерегулируемой скоростью перемещения и шаговый дискретный способ с регулируемой скоростью перемещения внутри одного шага. Преимуществами данного способа является простота реализации и надежность функционирования. Недостатки – низкое быстродействие и ограниченные функциональные возможности. Этим способом нельзя реализовать непрерывную скорость движения платформы робота.

Второй способ перемещения по вертикальной поверхности – шаговый непрерывный. Он позволяет производить непрерывное перемещение платформы робота в шаговом режиме, при котором фиксация одной группы захватных устройств и освобождение другой группы происходит без прерывания движения платформы. При этом способе расширяются функциональные возможности робота за счет получения непрерывной скорости движения платформы робота, а, следовательно, и установленного на ней технологического оборудования. Однако повышается сложность алгоритма и системы управления.

Третий способ – гусеничный. Он предполагает получение непрерывной скорости движения платформы робота за счет использования гусеничного механизма. Подвидами этого способа являются способ с использованием встроенных в гусеничный механизм захватных устройств и гусеничный способ с независимым использованием захватных устройств. В последнем способе гусеничный механизм служит только для организации поступательного движения робота в пределах свободного хода привода при зафиксированных захватных устройствах. Основным преимуществом гусеничного способа передвижения является высокая проходимость и надежность перемещения. К недостаткам можно отнести увеличенную сложность и вес конструкции.

Четвертый способ перемещения – антропоморфный. При этом способе передвижение осуществляется с помощью многозвенных опор, имитирующих движения живых существ, в частности, насекомых [15]. Этот способ требует наличия большого количества степеней свободы и развитой системы управления. Сложность конструктивной реализации при этом снижает надежность функционирования комплекса в целом. Однако данный способ обеспечивает наибольшую гибкость, например, при преодолении различных препятствий.

Пятый способ перемещения по вертикальным поверхностям – параллелограммный. Название способа следует из особенности его реализации, которая использует свойство параллелограмма, заключающееся в возможности поочередного перемещения его параллельных сторон при их шарнирном соединении. В этом случае отпадает необходимость использования двух платформ, что в сочетании с отсутствием приводов подъема и опускания захватных устройств обуславливает простоту и легкость конструкции [15]. При фиксации с помощью захватных устройств одной стороны параллелограмма, вторая сторона перемещается в заданном направлении, перенося закрепленные на ней свободные захватные устройства путем скольжения вдоль поверхности перемещения. Такой способ обеспечивает максимальную скорость движения, но имеет сравнительно невысокую надежность и ограниченные возможности в смысле технологических применений, поскольку здесь нет несущей рабочей платформы. Кроме того, эта конструкция обладает недостаточной жесткостью и небольшой грузоподъемностью.

2. Моделирование ориентации и передвижения транспортного модуля РВП

Для правильного синтеза структуры РВП с учетом специфики поставленной задачи, включающей перемещение технологического оборудования по выбранной траектории, в частности, в условиях неопределенности внешней ситуации, необходимо предварительное проведение моделирования ориентации и передвижения транспортного модуля РВП.

Применение моделей в процессах управления сложной многосвязной системой, каковой является подвижный РВП, имеет ряд особенностей. Это, прежде всего, недостаточное соответствие между событиями внешней среды и модельным представлением о них, которым наделяется искусственный интеллект робота. Кроме того, в многосвязной системе много переменных, поэтому использование обобщенных модельных представлений связано с редукцией данных и нечеткостью описания модели. Отображение внешнего мира в базе знаний автономной мобильной робототехнической системы, использующей визуальную информацию, носит часто описательный характер на естественном языке. В результате лингвистическое описание событий в базе знаний должно быть переведено в адекватную аналитическую форму. Все это вызывает определенные трудности при анализе и имитационном моделировании систем типа подвижного робота.

По этим причинам для разработки модели процесса ориентации и передвижения РВП целесообразным становится применение теории нечетких множеств [16-18]. Эта теория позволяет принимать четкие решения («дефазификаторы») при нечеткой исходной информации. Модель может учитывать как описательный (обобщенный) характер поступающей информации, так и неопределенность в восприятии и поведении робота, связанную с недостаточным соответствием между внешними событиями и субъективным представлением о них. Различные возможные подходы к описанию подобного рода нечетких моделей движения автономного робота можно найти в [16-20].

В качестве математического аппарата для моделирования ориентации и движения РВП используется теория нечетких моделей [17] и, в частности, предложенная в [16] модифицированная модель движущегося объекта.

Процедурные правила нечеткого контроллера постулируются в форме линейных уравнений с переменными коэффициентами.

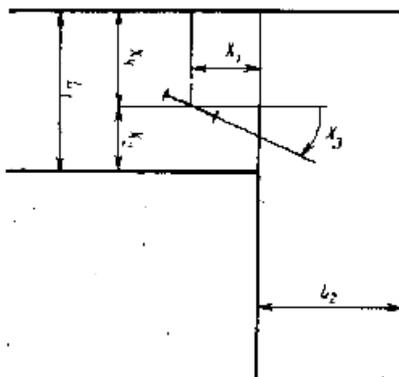


Рис. 2. Определение входных переменных X_1-X_4

Как и в [16], процедурное i -ое контрольное правило ($i = 1, 2, \dots, m$) записывается в форме:

$$R^i: x_1 \text{ есть } A_1^i, x_2 \text{ есть } A_2^i, \dots, \text{ есть } x_n \text{ есть } A_n^i, \tag{2.1}$$

$$\rightarrow y^j = P_0^i + P_1^i x_1 + \dots + P_n^i x_n, j=1, 2, \dots, n,$$

где A – нечеткие переменные, характеризующие в лингвистической форме переменные x_j на входе; P_j^i – коэффициенты в линейном уравнении для правила R^i ; y^j – угол поворота РВП относительно предыдущего его положения. Функция принадлежности μ нечеткого множества X записывается как $\mu(X)$ и аппроксимируется функциями (R-L)-типа [16]. Переменные A_j^i и x_j определяются в конкретной ситуации предметной областью исследования и описаны ниже для РВП (рис. 2). По входным значениям x_1^0, \dots, x_n^0 выход (угол поворота РВП на y^0 градусов) определяется через усреднение весов переменных y^j :

$$y^0 = \frac{\sum_{i=1}^m W^i y^i}{\sum_{i=1}^m W^i}, \tag{2.2}$$

$$W^i = \bigwedge_{j=1}^n \mu_j^i(x_j^0), \quad j = 1, 2, \dots, n. \tag{2.3}$$

Количество m нечетких правил в алгоритме управления соответствует числу тех комбинаций лингвистических переменных A_j^i ($j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m$), которыми можно описать данное положение робота (x_1^0, \dots, x_n^0).

Идентификация правил нечеткого алгоритма управления заключается, согласно [16, 18], в определении:

- числа нечетких градаций пространства входа (например, маленький, средний и большой для x_1 , маленький и большой для x_2 и т. д.);
- функций принадлежности $\mu(X)$ этих нечетких лингвистических переменных;
- коэффициентов в выводах логических правил управления.

Оператор может контролировать поворот и траекторию РВП, выводимую на экран монитора. Скорость РВП сохраняется постоянной, поэтому контролируется только его поворот.

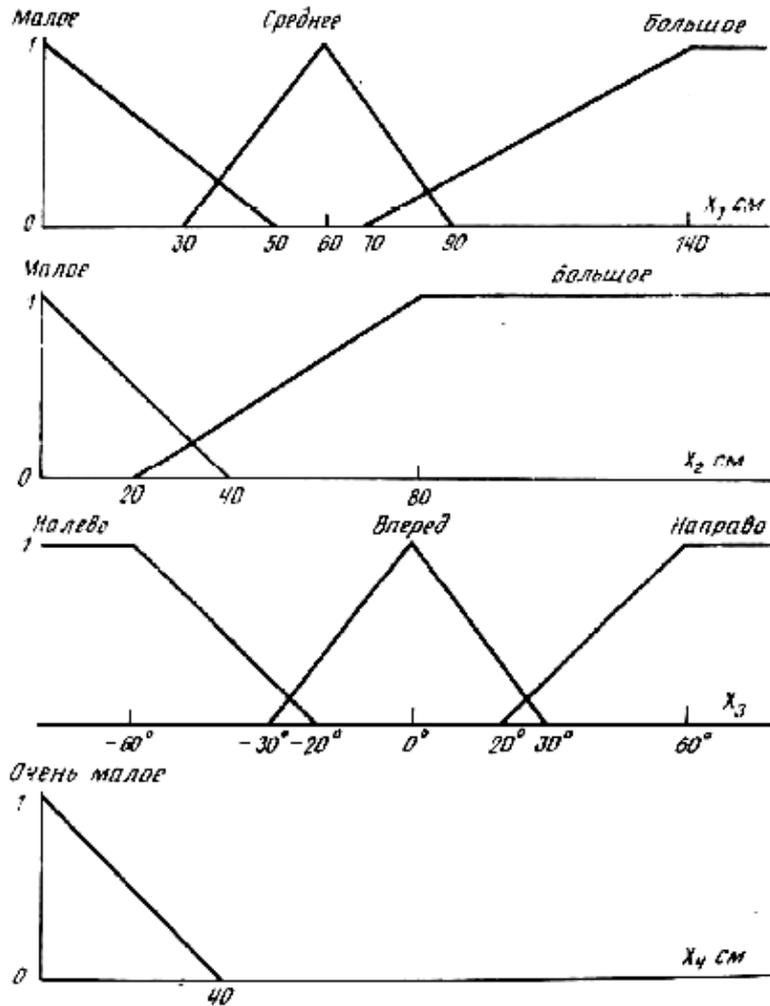


Рис. 3. Функции принадлежности для нечетких переменных

Определение нечетких правил управления производится, согласно [16, 18], таким образом, чтобы выходная ошибка (равная разнице результатов на выходе модели и выходе процесса) была минимальна. После выбора функций принадлежности по (2.2) коэффициенты $P_0^i - P_n^i$ определяются таким образом, чтобы минимизировать получаемую ошибку. Поскольку последняя нелинейна по отношению к параметрам функций принадлежности, процесс идентификации коэффициентов повторяется вместе с оптимизацией функций принадлежности [17].

В результате управление реализуется в модели в виде 20 контрольных правил. Согласно [16, 18], на входе (рис. 2) выбираются четыре переменные $x_i, i = 1, 2, 3, 4$, где x_1 – расстояние от РВП до первого угла поворота (см. рис. 2), x_2 – расстояние от пола, x_3 – направление движения робота, x_4 – расстояние от потолка. В качестве выходного результата получают величину y – угол поворота РВП.

Для нечеткого разделения пространства входа выбираются три нечеткие переменные для x_1 , две – для x_2 , три – для x_3 и одна – для x_4 . В [16] на основе анализа около 500 заданных типовых ситуаций «вход-выход», полученных для отобранных конкретных 18 траекторий движения, определены функции принадлежности и коэффициенты P_j^i . На рис. 3 показаны идентифицированные функции, связанные с лингвистическими уровнями описания входных переменных РВП. В табл. 1 и 2 приведены логические правила управления и коэффициенты P_j^i .

Таблица 1. Нечеткие переменные в контрольных правилах

| Правило | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| R^1 | — | — | Л | ОМ |
| R^2 | — | — | В | ОМ |
| R^3 | М | М | Л | — |
| R^4 | М | М | В | — |
| R^5 | М | М | П | — |
| R^6 | М | Б | Л | — |
| R^7 | М | Б | В | — |
| R^8 | М | Б | П | — |
| R^9 | С | М | Л | — |
| R^{10} | С | М | В | — |
| R^{11} | С | М | П | — |
| R^{12} | С | Б | Л | — |
| R^{13} | С | Б | В | — |
| R^{14} | С | Б | П | — |
| R^{15} | Б | М | Л | — |
| R^{16} | Б | М | В | — |
| R^{17} | Б | М | П | — |
| R^{18} | Б | Б | Л | — |
| R^{19} | Б | Б | В | — |
| R^{20} | Б | Б | П | — |

М – малое, С – среднее, Б – большее, ОМ – очень малое, Л – налево, П – направо, В – вперед.

Таблица 2. Коэффициенты в формуле (2.1) для логических правил управления $R^1 - R^{20}$

| Правила | P_0 | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 |
|----------|--------|--------|-------|--------|--------|
| R^1 | 3.000 | 0.000 | 0.000 | -0.045 | -0.004 |
| R^2 | 3.000 | 0.000 | 0.000 | -0.030 | -0.090 |
| R^3 | 3.000 | -0.041 | 0.004 | 0.000 | 0.000 |
| R^4 | 0.303 | -0.026 | 0.061 | -0.050 | 0.000 |
| R^5 | 0.000 | -0.025 | 0.070 | -0.075 | 0.000 |
| R^6 | 3.000 | -0.066 | 0.000 | -0.034 | 0.000 |
| R^7 | 2.990 | -0.017 | 0.000 | -0.021 | 0.000 |
| R^8 | 1.500 | 0.025 | 0.000 | -0.050 | 0.000 |
| R^9 | 3.000 | -0.017 | 0.005 | -0.038 | 0.000 |
| R^{10} | 0.053 | -0.038 | 0.080 | -0.034 | 0.000 |
| R^{11} | -1.220 | -0.016 | 0.047 | -0.018 | 0.000 |
| R^{12} | 3.000 | -0.027 | 0.000 | -0.044 | 0.000 |
| R^{13} | 7.000 | -0.049 | 0.000 | -0.041 | 0.000 |
| R^{14} | 4.000 | -0.025 | 0.000 | -0.100 | 0.000 |
| R^{15} | 0.370 | 0.000 | 0.000 | -0.007 | 0.000 |
| R^{16} | -0.900 | 0.000 | 0.034 | -0.030 | 0.000 |
| R^{17} | -1.500 | 0.000 | 0.005 | -0.100 | 0.000 |
| R^{18} | 1.000 | 0.000 | 0.000 | -0.013 | 0.000 |
| R^{19} | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -0.006 | 0.000 |
| R^{20} | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -0.010 | 0.000 |

Программа предусматривает:

- возможность осуществления ручного и автоматического режимов управления РВП;
- создание и использование библиотеки стандартных планов помещений;
- возможность изображения новых сцен планов с помощью блока когнитивной графики (КГ), а также коррекции библиотечных планов в процессе работы при получении дополнительной информации от РВП.

Блок-схема программы приведена на рис. 4.

Блок-схема подпрограммы, осуществляющей автоматическое управление движением РВП, показана на рис. 5.

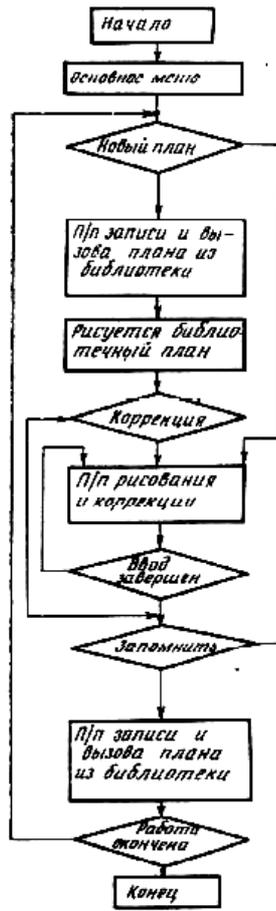


Рис. 4.

Рис. 4. Блок-схема программы моделирования ориентации и передвижения робота

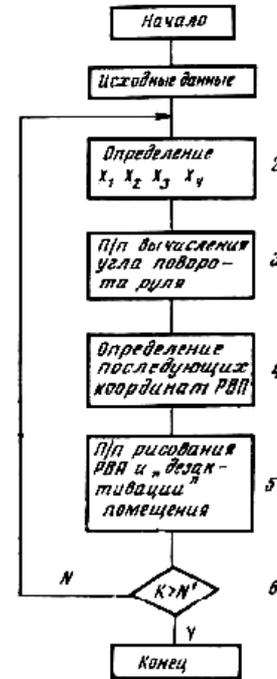
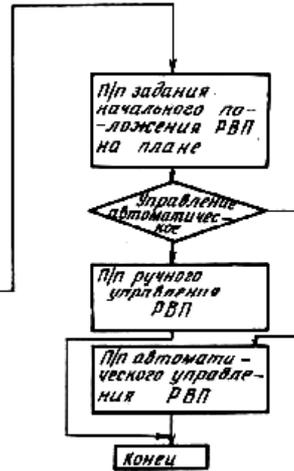


Рис. 5

Рис. 5. Блок-схема подпрограммы управления движением робота по нечеткому алгоритму

Подпрограмма позволяет на основе алгоритма нечеткой логики и процедурных правил управления осуществлять автоматическое перемещение РВП по периметру помещения заданной планировки.

Блок 1 формирует исходные данные:

1. начальные координаты РВП;
2. таблицы 1 и 2 коэффициентов P_j^i и процедурных правил;
3. функции принадлежности для переменных x_1, x_2, x_3, x_4 в соответствии с рис. 3;
4. совокупность лингвистических переменных A_j^i .

Блок 2 определения значений x_1, x_2, x_3, x_4 (входных переменных, характеризующих местоположение РВП) функционирует на основе знания координат РВП и информации о плане помещения. На практике это равносильно измерению РВП расстояний до пола или препятствий с помощью датчиков.

Подпрограмма вычисления угла поворота РВП (блок 3) отработана по схеме нечеткой логики и процедурным правилам управления, изложенным ранее. Используются лингвистическая градация и функции принадлежности переменных (x_1-x_4) , представленные на рис. 3. Подпрограмма блока 3 включает в себя следующие составные части:

1. преобразование входных переменных $x_1 - x_4$ в лингвистическую форму A_j^i ($j = 1, \dots, 4; i = 1, \dots, 20$);
2. определение наборов $A_1^i - A_4^i$ и функций принадлежности $\mu_j^i(x_j)$ для заданных переменных $x_1 - x_4$ с условиями соответствия $x_1^i \rightarrow A_1^i, x_2^i \rightarrow A_2^i, x_3^i \rightarrow A_3^i, x_4^i \rightarrow A_4^i$;
3. идентификация номера i контрольного правила R^i в процедуре нечеткого управления;

4. вычисление значения угла поворота u_n для данного шага в операторе цикла.

Определение последующих координат РВП (блок 4) происходит на основе рекуррентных формул, включающих в себя шаг, текущие координаты РВП и угол поворота u_n для данного шага в цикле.

Подпрограмма рисования РВП и, например, «деактивации» помещения (блок 5) служит для изображения робота на экране, а также для уничтожения пятен – областей, характеризующих радиационное загрязнение (в случае, если маршрут РВП проходит через них). В результате создается графическое изображение очистки зоны заражения после прохождения РВП.

Условный переход (блок 6) контролирует момент завершения маршрута. Здесь K – номер стены, вдоль которой движется РВП, N' – общее число препятствий.

Изложенная схема моделирования позволяет осуществлять автоматическое передвижение РВП в помещениях различной планировки и с различными препятствиями практически без участия оператора. Необходимым условием для данного режима работы является информация о местоположении робота относительно пола или препятствий (x_j-x_j). На практике это достигается путем установки на борту РВП датчика, измеряющего необходимые расстояния.

На рис. 6 показан маршрут, пройденный РВП в результате моделирования его передвижения в автоматическом режиме управления.

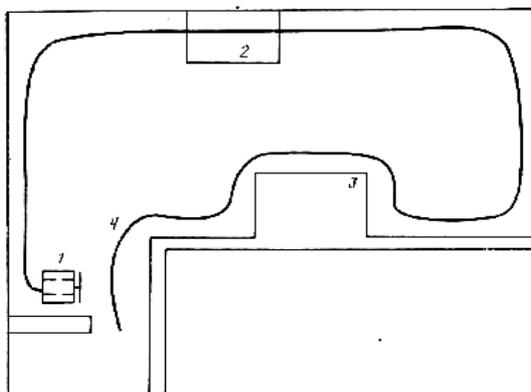


Рис. 6. Моделирование движения робота на экране компьютера: 1 – робот; 2 – зона радиоактивного заражения; 3 – препятствия; 4 – маршрут движения робота в автоматическом режиме управления

Отметим, что результаты моделирования обхода препятствий и задачи движения РВП по периметру служебного помещения АЭС показали работоспособность предложенного нечеткого алгоритма управления робототехническим комплексом РВП.

3. Анализ механической системы РВП для выполнения различных технологических задач

В зависимости от решаемой с помощью РВП задачи, его структура может видоизменяться при сохранении модульности построения комплекса в целом.

Основные принципы изменения структуры РВП можно проследить, исходя из анализа реализаций комплекса для решения задач очистки, покраски, резки и инспекции.

Операции очистки вертикальных поверхностей возникают в связи с различными технологическими применениями, например, при мойке стекол высотных зданий, деактивации поверхностей сооружений атомных станций и других. Особенности конструкции транспортного модуля определяются требованиями повышенной маневренности робота для обеспечения возможности сканирования всей площади поверхности независимо от ее конфигурации. Таким образом, с одной стороны, транспортный модуль должен иметь сравнительно небольшие габариты, а с другой стороны – должен обеспечивать достаточную грузоподъемность, чтобы нести как массу очищающих устройств, смонтированных на транспортном модуле, так и массу емкостей с моющими средствами, либо массу связывающих с ними коммуникаций. Указанная проблема решается за счет дополнительного развития

системы захватных устройств при сохранении общих размеров платформ робота. При очистке хрупких поверхностей, например, стекол, в конструкции захватных устройств исключается применение металлических элементов рабочей поверхности, в то время как при очистке бетонных поверхностей со значительными неровностями такие элементы часто бывают необходимы. Спецификой операции очистки поверхностей от радиоактивных загрязнений является требование ее полной автоматизации. Это приводит к тому, что в структуре РВП появляется дополнительный блок автоматического сопряжения транспортного модуля с транспортным средством горизонтального перемещения. Этот блок обеспечивает доставку робота в рабочую зону, установку его на очищаемую поверхность и снятие после выполнения технологической операции в автоматическом режиме для возвращения на исходную позицию.

На рис. 7 представлена фотография экспериментального комплекса, выполняющего описанный алгоритм функционирования.

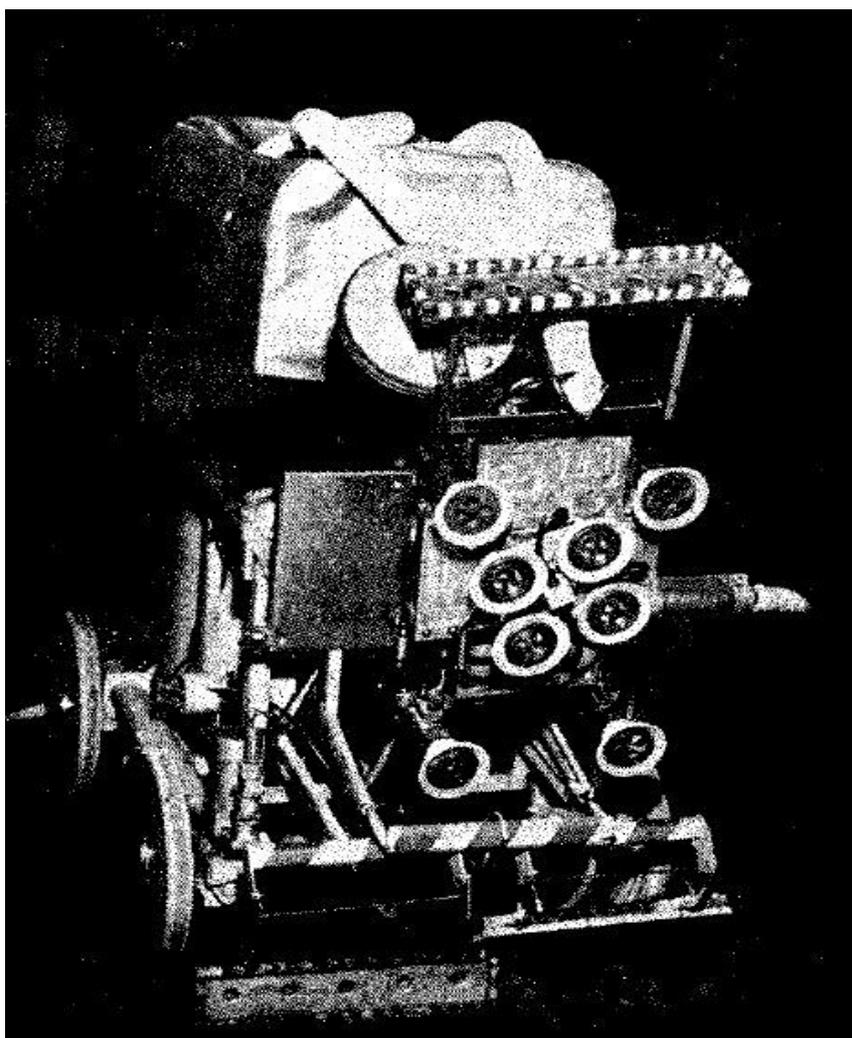


Рис. 7. Дистанционно-управляемый робототехнический комплекс очистки

Этот комплекс имеет самоцентрирующий блок автоматического сопряжения транспортного модуля РВП, что обеспечивает его надежную стыковку с транспортным средством горизонтального перемещения при наличии отклонений от программного исходного положения при снятии с вертикальной поверхности в диапазоне ± 300 мм. В данном случае емкости с моющими средствами и вакуумная установка, обеспечивающая работу щеток, смонтированных на РВП, расположены на транспортном роботе горизонтального перемещения. Это позволяет избавить транспортный модуль РВП от дополнительной нагрузки и тем самым повысить его мобильность. Для приведенной задачи важное значение имеет повышенная помехозащищенность коммуникаций системы управления комплексом от радиации, что достигается применением известных средств оптоволоконной связи.

При использовании РВП для задачи покраски появляется возможность упрощения конструкции транспортного модуля за счет выполнения технологического модуля с автономным манипулятором. В манипуляторе закрепляется краскопульт, траектория движения которого определяется не только транспортным модулем при его перемещении, как в приведенном выше случае очистки, но и движением манипулятора.

На рис. 8(а) показана результирующая траектория такого комбинированного движения. При необходимости получения постоянной скорости передвижения транспортного модуля для равномерности покраски на каждой из платформ робота устанавливаются синхронизированные друг с другом через систему управления приводы. Один из вариантов реализации РВП для операций покраски приведен на рис. 8(б). Его отличает компактность и сравнительно высокая скорость перемещения. Подача краски осуществляется с помощью насосного устройства эжекционного типа, установленного на борту робота.

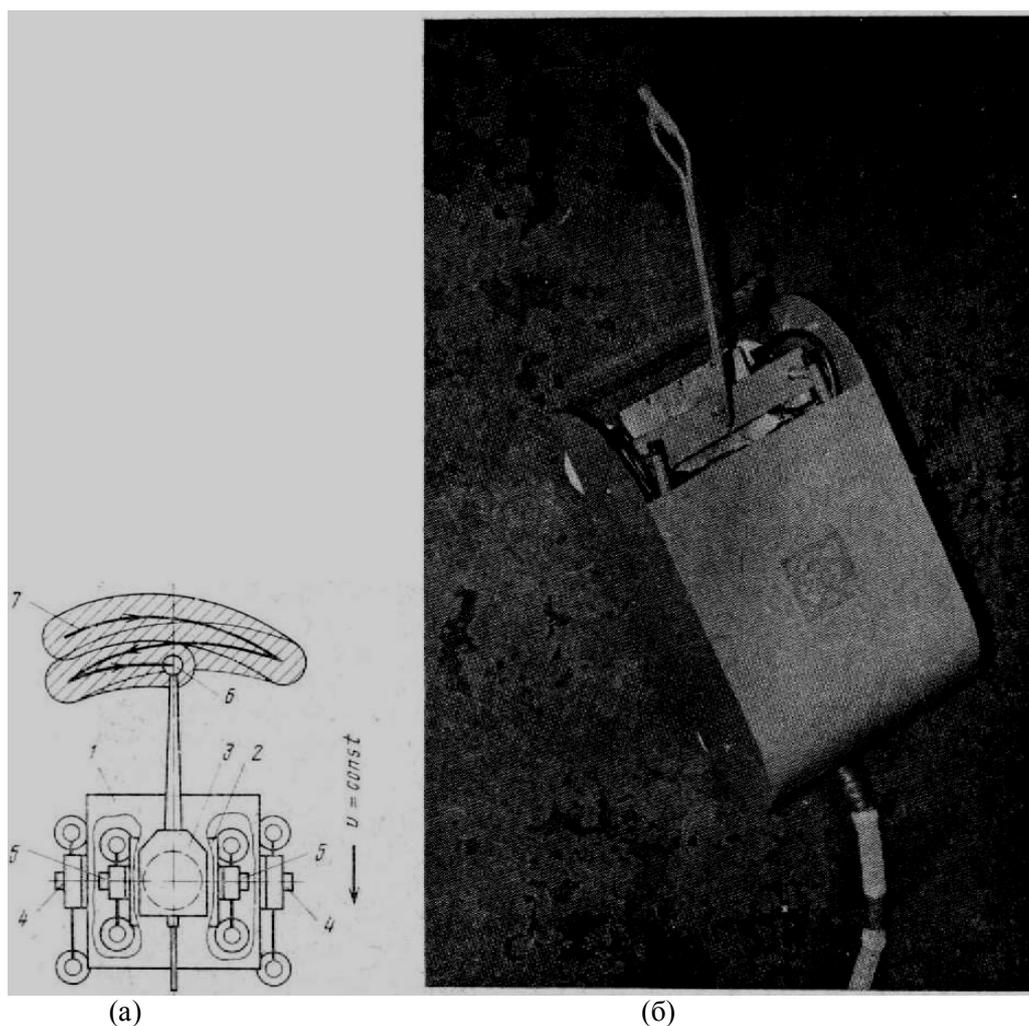


Рис. 8. Покрасочный РВП: (а) Схема выполнения операции покраски: 1 – внешняя платформа; 2 – внутренняя платформа; 3 – устройство поворота; 4, 5 – блоки регулирования скорости; 6 – краскопульт; 7 – траектория движения краскопульта. (б) Общий вид покрасочного РВП

Задача резки металлических поверхностей с помощью РВП отличается сложностью реализации транспортного и технологического модуля. Например, для вырезки отверстия в стене резервуара (в частности при проведении противопожарных операций) необходимо поднять тяжелое технологическое оборудование массой до 40 кг на высоту до 20 м и обеспечить прохождение резаком контура отверстия общей длиной до 10 м за данное время. Оптимальным путем решения этой проблемы является сдваивание технологического инструмента, в данном случае резака. Схема робота с такой структурой дана на рис. 9.

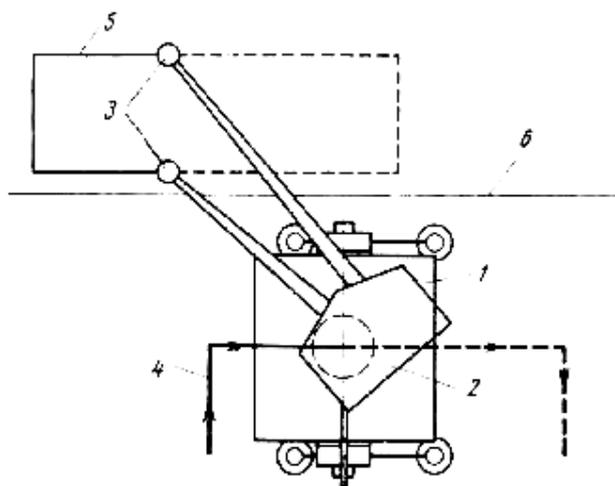


Рис. 9. Схема выполнения операции вырезки отверстия: 1 – транспортный модуль; 2 – технологический модуль; 3 – резаки; 4 – траектория движения центра робота; 5 – контур вырезаемого отверстия; 6 – граница поверхности перемещения

Два резака технологического модуля установлены неподвижно относительно центра робота, который перемещается по траектории, обеспечивающей прохождение контура отверстия резаками. При этом система управления должна реализовать пять моментов переключения в соответствии с циклограммой работы технологического оборудования, приведенной на рис. 10.

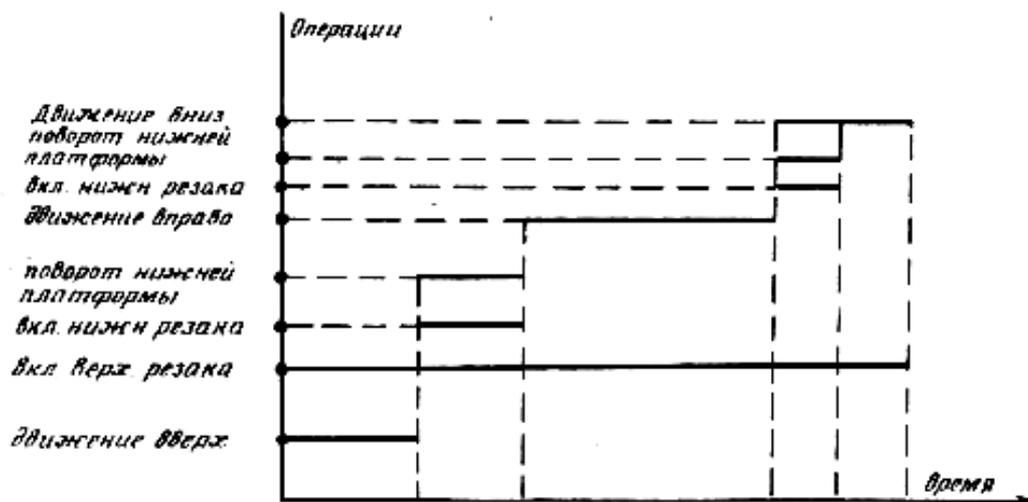


Рис. 10. Циклограмма работы технологического оборудования для операции вырезания замкнутого контура

Общий вид реализации робота с модулем резки показан на фотографии (рис. 11).

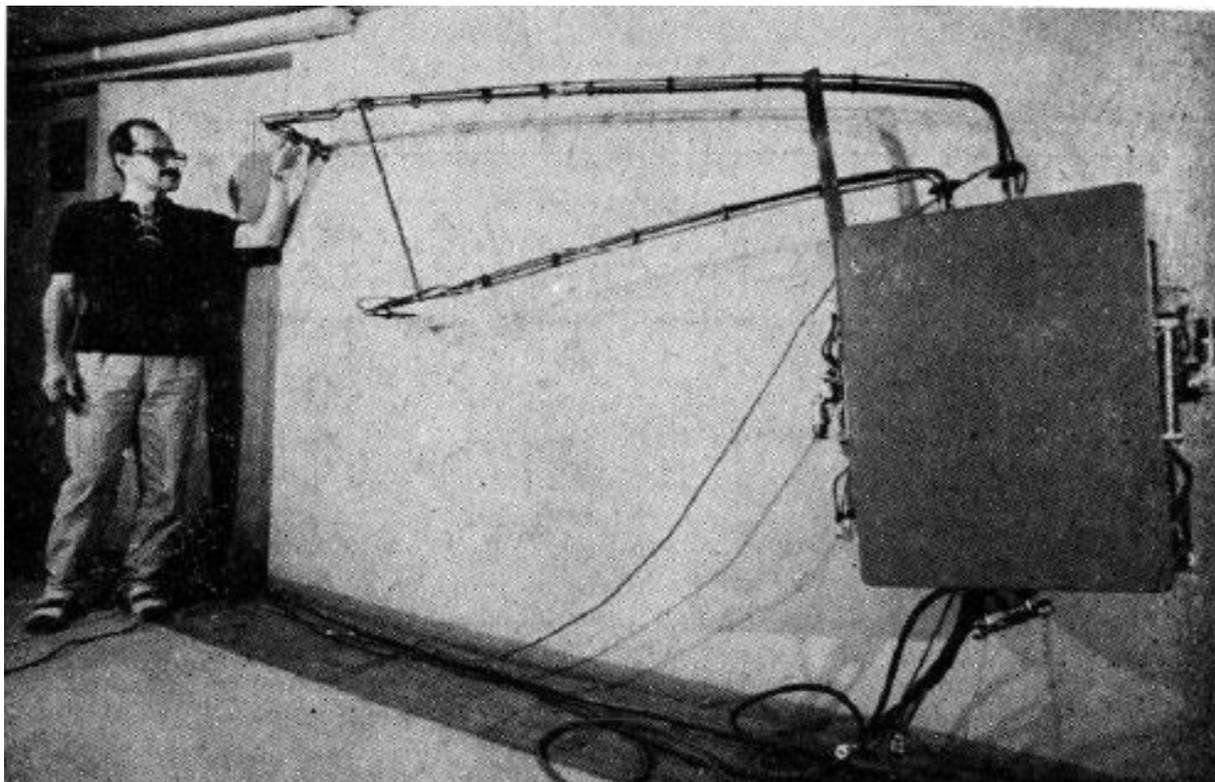


Рис. 11. Общий вид робота с модулем резки

При его использовании в противопожарных операциях в целях защиты от теплового излучения корпус выполняется с обшивкой из теплоотражающей металлизированной кремнеземной ткани ТК-11-ТОО, что позволяет сохранять работоспособность систем при температурах до 300° С. В этом случае в структуре транспортного модуля появляется блок охлаждения воздуха, который целесообразно выполнять на базе выхлопных магистралей пневматических исполнительных механизмов, используемых в приводных и захватных устройствах робота [9]. Выполнение инспекции поверхности перемещения с помощью РВП, кроме непосредственного осуществления контрольно-измерительных операций, например, диагностики качества поверхности посредством телекамеры, позволяет также использовать поступающую информацию для навигации робота.

Результаты испытаний робота, изображенного на рис. 12, который оснащен ультразвуковым датчиком, показали, что он может обнаруживать препятствия на расстоянии до 2 м. Благодаря этому он способен своевременно передавать сигналы обратной связи на систему управления, которая корректирует траекторию движения робота с целью обхода обнаруженного препятствия. Это свойство особенно важно при движении робота в условиях неопределенной обстановки с помощью дистанционного управления. Другим примером использования измерительной информации служит автоматический поиск места надежного захвата опор робота с поверхностью. При контакте опор с поверхностью датчик измерения качества поверхности в случае обнаружения дефектов под опорой, мешающих ее фиксации, дает сигнал в систему управления на перенос опоры в другое место.

Таким образом, в структуре робота появляется блок адаптации, расширяющий его эксплуатационные возможности. Это позволяет строить более гибкие системы, одной из которых является система инспектирования вертикальных труб с локальными изгибами.

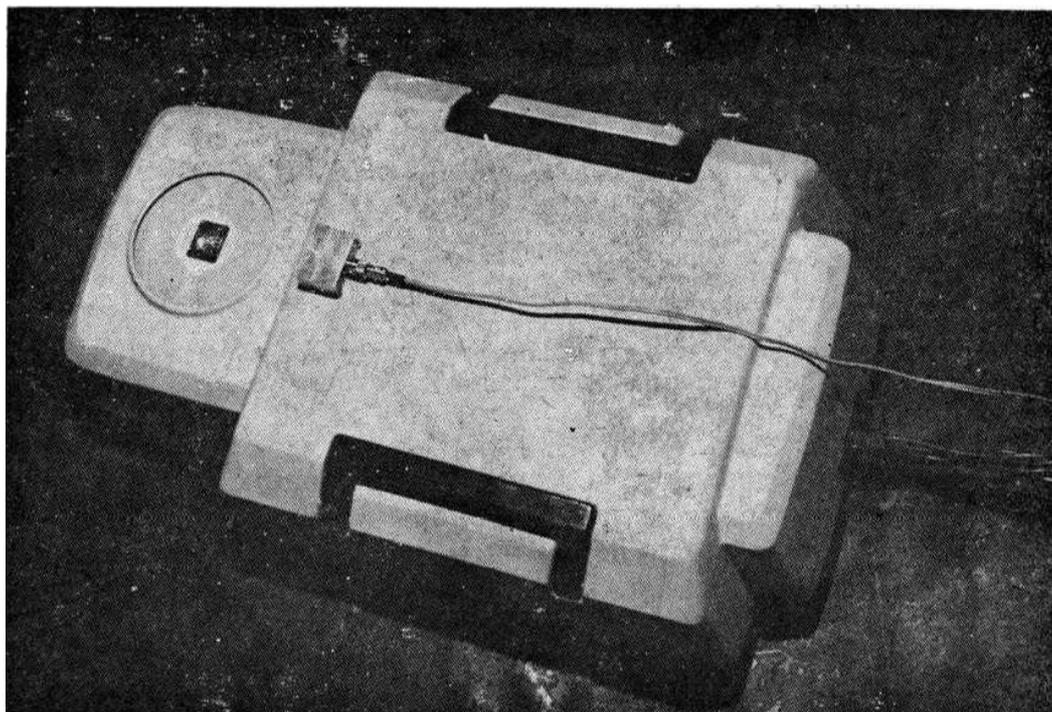


Рис. 12. Диагностический робот с ультразвуковым датчиком

На рис. 13 приведена схема РВП для перемещения внутри труб с изгибами.

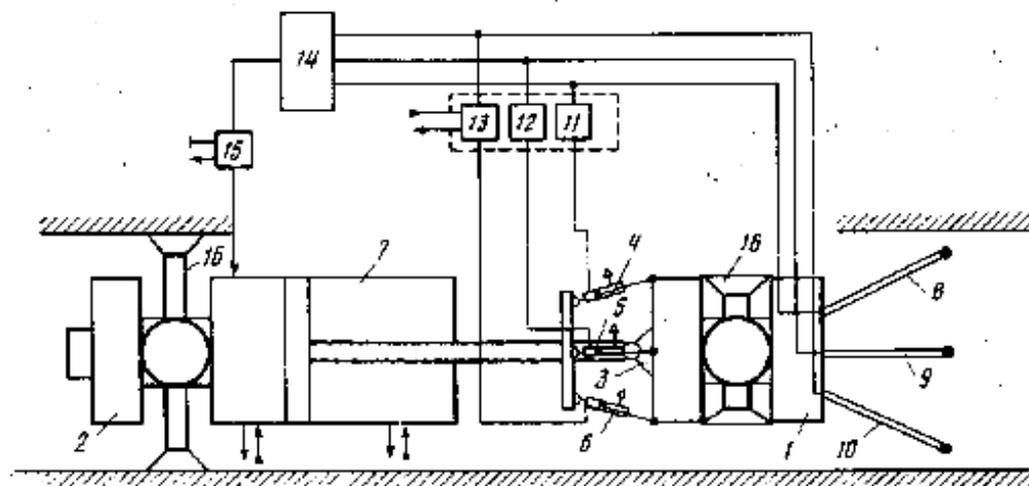


Рис. 13. Схема РВП для перемещения внутри труб с изгибами: 1 – передний опорный пояс; 2 – задний опорный пояс; 3 – шарнир; 4, 5, 6 – корректирующие цилиндры; 7 – силовой цилиндр; 8, 9, 10 – датчики; 11, 12, 13 – корректирующие клапаны; 14 – элемент ИЛИ; 15 – силовой клапан; 16 – опоры

На работе может быть установлена диагностическая аппаратура. Движение робота производится с помощью поочередной фиксации опор опорных поясов и силового цилиндра. При отсутствии изгибов в трубе датчики не касаются ее поверхности, и робот перемещается прямолинейно. В данном режиме корректирующие клапаны соединены с атмосферой, на выходе элемента «ИЛИ» нет управляющего сигнала, и силовой клапан связывает бесштоковую полость силового цилиндра с глухой камерой. При подходе к изгибу трубы один или два датчика входят в контакт с внутренней поверхностью трубы и выдают сигналы на соответствующие корректирующие клапаны. Эти клапаны управляют корректирующими цилиндрами для перемещения переднего пояса вокруг шарнира в сторону исключения контакта датчиков с поверхностью трубы. Три датчика, расположенные под углом 120° по сечению трубы, позволяют обеспечить пространственное отслеживание произвольного изгиба оси трубы. В момент касания поверхности трубы хотя бы одним датчиком поступательное движение ро-

бота прекращается, так как на выходе элемента «ИЛИ» появляется сигнал на соединение бесштоковой полости силового цилиндра с атмосферой через силовой клапан.

После коррекции положения переднего пояса поступательное движение робота продолжается до окончания рабочего хода силового цилиндра. При значительных изгибах трубы происходит несколько корректировок положения переднего пояса за один рабочий ход силового цилиндра. После этого передний пояс фиксируется на поверхности трубы, а задний пояс подтягивается к переднему. Затем цикл движений повторяется.

Перспективным направлением развития РВП является создание роботов, способных переходить с одной поверхности на другую в автоматическом режиме. Этот класс роботов в определенном смысле синтезирует себе возможности всех рассматриваемых конструкций РВП.

На рис. 14 приведена схема робота, который обеспечивает переход на поверхность, расположенную под любым углом наклона (по величине и по знаку) к направлению его движения.

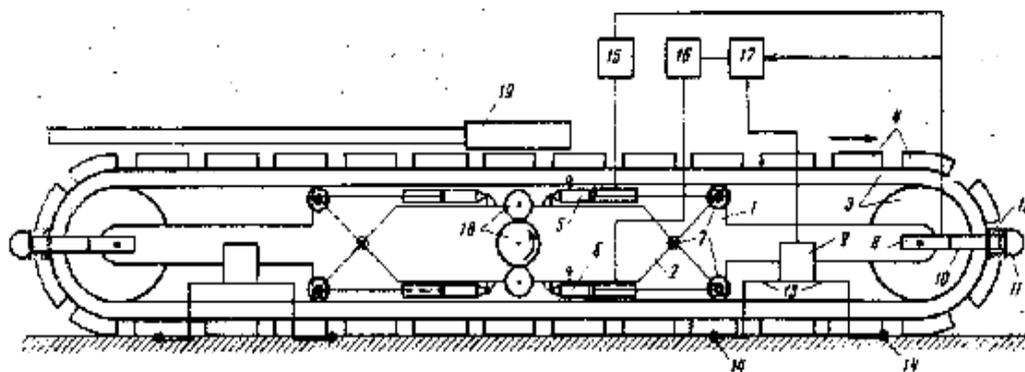


Рис. 14. Схема РВП с возможностью перехода с одной поверхности на другую: 1 – платформа; 2 – корпус; 3 – гусеничный механизм; 4 – захватные устройства; 5, 6 – корректирующие цилиндры; 7 – шарниры; 8, 9 – выключатели; 10 – шуп; 11 – датчик препятствия; 12 – пружина; 13 – датчик опоры; 14 – опоры; 15, 16 – клапаны; 17 – релейный элемент; 18 – редуктор; 19 – канал питания

Разработанная конструкция содержит комбинированный привод перемещения двух платформ, содержащих гусеничный механизм со встроенными захватными устройствами, а также блок автоматической коррекции направления движения платформ при переходе робота с одной поверхности на другую. Прямолинейное движение робота осуществляется посредством силового привода, который перемещает гусеничный механизм с захватными устройствами. При этом мощность силового привода должна обеспечивать отрыв от поверхности перемещения только одного захватного устройства в каждый момент времени, в то время как фиксация устройства осуществляется суммой всех контактирующих с поверхностью перемещения захватных устройств. Для возможности прохода неровностей при движении робота штоковые полости корректирующих цилиндров соединены с атмосферой через соответствующие клапаны, что придает конструкции необходимую податливость. При переходе на поверхность, составляющую с исходной угол до 90° и больше (поворот влево на рис. 14), датчик препятствия входит в контакт с этой поверхностью и через шуп воздействует на выключатель, который задействует соответствующий корректирующий цилиндр. Поскольку корректирующие цилиндры связаны с передней платформой, то она переходит на новую поверхность. Если эта поверхность имеет наклон больше 90° , то во время перехода датчик препятствия вдавливая подпружиненное звено шупа, не создавая механического сопротивления движению и, в то же время, поддерживая выключатель вертикали в замкнутом состоянии. Сигнал с выключателя вертикали на релейный элемент позволяет перед отрывом датчика опоры от поверхности перемещения разомкнуть управляющую цепь соответствующего корректирующего цилиндра, что обеспечивает движение робота по потолку. При выходе на новую поверхность ее контакт с датчиком препятствия прерывается и выключатель вертикали через клапан соединяет штоковую полость соответствующего корректирующего цилиндра с атмосферой. Релейный элемент при этом снова замыкается. Находясь на ровной поверхности, гусенич-

ный механизм автоматически выравнивает положение платформ. При переходе на поверхность, составляющую отрицательный угол с исходной (поворот вправо на рис. 14), датчик опоры выходит из контакта с поверхностью перемещения и выключатель опоры замыкается. В результате задействуется соответствующий корректирующий цилиндр и происходит аналогичный вышеописанному процесс перемещения передней платформы вниз до момента касания датчиком опоры новой поверхности перемещения. Для обеспечения заднего хода задействуются симметричные блоки задней платформы. Поворот робота осуществляется путем сдвигания рассмотренной конструкции на общем корпусе и независимого управления скоростью каждого гусеничного механизма. Эта функция реализуется системой управления робота.

На систему управления РВП возлагаются задачи по согласованию работы нескольких роботов, одновременно выполняющих одну технологическую операцию. Это может быть связано как с распределением частей одного технологического оборудования для обеспечения общей высокой грузоподъемности комплекса РВП, так и с размещением различного технологического оборудования на разных роботах, выполняющих одну комплексную задачу.

Одним из перспективных вариантов взаимодействия нескольких роботов является использование одного транспортного РВП, на борту которого располагаются несколько технологических РВП.

После доставки технологических роботов в рабочую зону с помощью транспортного робота, они переходят в режим независимого функционирования, а по окончании возложенных на них операций возвращаются на борт транспортного робота. Таким образом достигается увеличение ресурса работы технологического РВП и повышается мобильность и гибкость комплекса в целом.

4. Захватные устройства роботов вертикального перемещения

Захватные устройства являются узлом, определяющим надежность функционирования робота на вертикальных плоскостях.

Наибольшей универсальностью в смысле возможности фиксации как на металлических, так и на неметаллических поверхностях обладают вакуумные хватные устройства (ВЗУ). Особенностью ВЗУ для роботов вертикального перемещения является сочетание вакуумной и механической фиксации для достижения максимально возможной величины сцепления с поверхностью по всем вероятным направлениям отрывающих усилий, воздействующих на робот в процессе его перемещения в вертикальном положении.

Конструктивно ВЗУ включает эластичный хват, внутри которого находится опора сцепления, жестко соединенная с приводом подъема-опускания. Он оснащен датчиком положения, реализующим обратную связь с системой управления. Полость эластичного захвата связана с эжектором. Эластичный хват выполняет функцию элемента, герметизирующего вакуумируемый объем ВЗУ при фиксации. Опора сцепления, кроме функции несущей конструкции ВЗУ, обеспечивает механическую фиксацию за счет сил сцепления с поверхностью, возникающих одновременно с вакуумированием полости эластичного захвата из-за прижатия опоры к поверхности.

Для увеличения сил фиксации в ряде случаев опору сцепления целесообразно выполнять с остроконечными выступами. Привод подъема-опускания, связанный с корпусом робота, осуществляет ввод эластичного захвата с опорой сцепления в контакт с поверхностью фиксации и возврат ВЗУ в исходное положение после отключения эжектора для реализации очередного шага робота. Использование эжекторов в качестве источников вакуума в ВЗУ объясняется тем, что они работают независимо на каждом ВЗУ робота, что важно для надежности его функционирования. Существенными преимуществами эжекторов при этом являются их малые габариты и вес, а также исключение необходимости подвода вакуумного канала на высоту перемещения робота. Датчик вакуума контролирует минимально допустимое разрежение в полости захвата [21].

Методика испытаний ВЗУ предусматривает определение основных рабочих характеристик, к которым относится изменение усилий отрыва и сдвига ВЗУ в зависимости от давления питания на входе эжектора для различных видов поверхности фиксации.

На рис. 15 приведены расчетные зависимости усилий отрыва от входных давлений на эжекторе для различных эффективных диаметров рабочих поверхностей ВЗУ при отсутствии неплотностей при фиксации на поверхности.

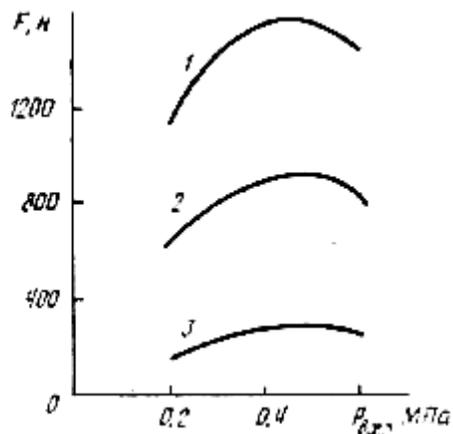


Рис. 15

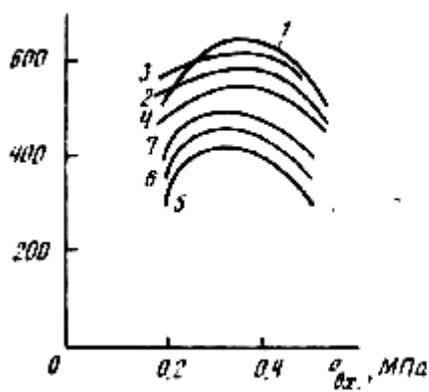


Рис. 16

Рис. 15. Расчетные зависимости усилий отрыва ВЗУ от входных давлений на эжекторе: 1 – для захвата с диаметром 150 мм; 2 – для захвата с диаметром 128 мм; 3 – для захвата с диаметром 64 мм

Рис. 16. Экспериментальные зависимости усилий отрыва и сдвига ВЗУ от входных давлений на эжекторе: 1 – отрыв от сухой поверхности; 2 – отрыв от замасленной поверхности; 3 – сдвиг на сухой поверхности; 4 – сдвиг на замасленной поверхности; 5, 6, 7 – комбинированное воздействие соответственно при 20° С, при 150° С и при 300° С на сухой поверхности

Наибольший практический интерес представляют испытания ВЗУ для реальной конструкции робота вертикального перемещения, параметры которого были оптимизированы исходя из теоретических расчетов по обеспечению заданной несущей способности транспортного модуля при ограничении на его габариты. Диаметр рабочей поверхности ВЗУ составляет 128 мм. Эластичный захват изготовлен из герметика ВИКСИНТ У2-28. Указанный материал при рабочем давлении уплотняет микронеровности на поверхности фиксации и обладает повышенной термостойкостью, что необходимо для таких применений роботов вертикального перемещения, как выполнение противопожарных операций [9]. Качество поверхностей фиксации при испытаниях соответствовало классам чистоты поверхности в диапазоне 3,2-50, что охватывает широкий круг реальных поверхностей для таких практических задач, как, например, инспектирование металлических резервуаров, а также испытывались поверхности с неровностями до 0,3 мм.

На рис. 16 приведены результаты исследований по определению усилий отрыва и сдвига ВЗУ в зависимости от давления питания эжектора. Испытания проводились как с сухими поверхностями, так и с поверхностями, покрытыми машинным маслом, что моделирует реальные условия эксплуатации робота, в частности, на резервуарах с горюче-смазочными материалами.

На рис. 16 зависимости 1 и 2 характеризуют отрыв ВЗУ соответственно от сухой и замасленной поверхности, а зависимости 3 и 4 – сдвиг ВЗУ, соответственно, на тех же видах поверхностей. Зависимость 5 получена при комбинированном воздействии на ВЗУ с использованием сухой поверхности при температуре 20° С.

Из полученных результатов вытекает, что максимальное усилие отрыва возникает при давлении питания в диапазоне (0,3-0,4) МПа. Это связано с особенностями рабочих характеристик эжектора. В случае замасленной поверхности (рис. 16, характеристика 2) усилие отрыва уменьшается на 7%. Максимальное усилие сдвига на сухой поверхности на 5% меньше, чем соответствующее максимальное усилие отрыва, однако характеристика имеет более пологую форму, что расширяет диапазон рабочих давлений питания на 25%. В случае замасленной поверхности усилие сдвига снижается более, чем на 10%. Таким образом, при сдвиге уменьшение коэффициента трения более критично, чем при отрыве. Как правило, в реальных условиях работы отрывающее и сдвигающее усилия действуют на ВЗУ одновременно.

Результаты моделирования данной ситуации отражены характеристикой 5 (рис. 16). Из сравнения характеристик для отдельного и комбинированного воздействия усилий отрыва и сдвига видно, что реальный запас надежности удержания можно определять по результатам моделирования отдельных воздействий с поправкой в сторону увеличения запаса надежности на 30% от полученного усилия в оптимальной зоне давлений питания, которая находится в пределах (0,3-0,4) МПа.

Одной из определяющих характеристик использования робота с ВЗУ при выполнении противопожарных операций является возможность работы в условиях повышенных температур. К основным требованиям для ВЗУ при этом относится термостойкость эластичного захвата. Результаты температурных испытаний представляют собой, соответственно, характеристики 6 и 7, полученные при комбинированном нагружении ВЗУ. Как видно из графиков, при нагревании поверхности фиксации на каждые 100°C силы фиксации увеличиваются примерно на 5%. Это явление объясняется тем, что с возрастанием температуры захват ВЗУ становится более эластичным и, следовательно, улучшаются условия герметизации его вакуумной полости. Данный эффект наблюдается до величины температуры, соответствующей тепловому разрушению материала, из которого изготовлена рабочая поверхность захвата ВЗУ. Приведенные на рис. 16 характеристики практически не меняются для поверхностей фиксации с шероховатостью до 50 мкм.

На рис. 17 приведены зависимости уменьшения вакуума при наличии неровностей до 300 мкм (график 1), а также при наличии единичных неплотностей в вакуумном канале ВЗУ в виде калиброванных отверстий, сообщающих его с атмосферой, соответственно, с диаметрами 0,9 мм (график 2) и 1,8 мм (график 3).

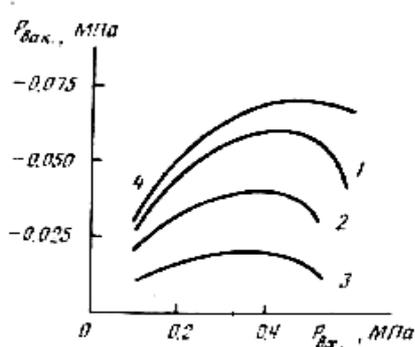


Рис. 17

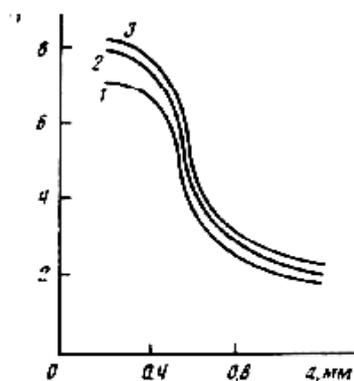


Рис. 18

Рис. 17. Экспериментальные зависимости величины вакуума в канале эжектора от входных давлений на эжекторе при различных неплотностях: 1 – неровности поверхности фиксации до 300 мкм; 2 – неплотность диаметром 0,9 мм; 3 – неплотность диаметром 1,8 мм; 4 – отсутствие неплотностей

Рис. 18. Экспериментальные зависимости времени вакуумирования различных объемов полости захвата от диаметра дросселя в канале эжектора: 1 – объем 10 см^3 ; 2 – объем 20 см^3 ; 3 – объем 30 см^3

Указанные диаметры соответствуют диаметрам дросселей в вакуумных каналах ВЗУ робота, поэтому графики 2 и 3, кроме моделирования случая увеличения величины неплотностей, позволяют оценить ситуацию, при которой несколько ВЗУ питаются от одного вакуумного канала. Эти данные имеют важное значение при проектировании робота со сдвоенными и строенными ВЗУ на одном приводе подъема-опускания.

Из экспериментальных результатов следует, что по сравнению с величиной вакуума в герметичном канале эжектора (график 4) при рабочих давлениях на входе эжектора степень вакуума в захвате ВЗУ на поверхности с неровностями до 300 мкм падает примерно на 15%, а при неплотностях, имитируемых дросселями с диаметрами 0,9 мм и 1,8 мм соответственно на 40% и 70%. Динамика работы ВЗУ характеризуется временем выхода давления на заданную величину вакуума в полости захвата при непосредственной связи с ним эжектора.

На рис. 18 представлены зависимости указанного времени от диаметра дросселя в канале эжектора для различных объемов полости захвата. Уровень вакуума величиной 0,05 МПа при дросселе диаметром 0,2 мм для объемов от 10 см³ до 30 см³ достигается за время порядка 8 с, а для диаметра 1,2 мм – за время порядка 2 с. Эти параметры необходимо учитывать при расчете задержек в управляющей программе движения робота, которые определяют временной интервал между очередными командами, например, на смену фиксации одной группы ВЗУ на другую с сохранением надежности захвата при требуемом быстродействии. С конструкторской точки зрения графики на рис. 18 могут использоваться для выявления целесообразной величины дросселей вакуумного канала и объема полостей захвата ВЗУ. Результаты испытаний позволяют выбрать наилучшие рабочие режимы ВЗУ в зависимости от конкретных условий эксплуатации робота, а также определять их необходимое количество и комбинацию для обеспечения требуемой грузоподъемности с целью перемещения технологического оборудования по вертикальным поверхностям.

Заключение

В последнее время большое внимание в разных странах уделяется созданию автономных робототехнических систем, способных перемещаться в сложной обстановке при наличии препятствий. При этом организация перемещения по вертикальным и наклонным поверхностям с надежной фиксацией на этих поверхностях представляет собой одну из фундаментальных технических задач, так как такие поверхности являются важнейшей составной частью различных сооружений. Движение по подобным поверхностям требует от робота обеспечения значительных усилий сцепления, которые должны быстро и надежно регулироваться системой управления. В этом плане очень важным направлением работ является усовершенствование захватных устройств, в частности, вакуумных. Для движения по поверхностям сложной конфигурации, включающим горизонтальные и вертикальные участки, большое значение приобретает создание комбинированных мобильных систем, содержащих модули вертикального и горизонтального перемещения с узлами их сопряжения. Разнообразие возможных мобильных систем обуславливается как большим различием поверхностей движения, так и многообразием технологических задач, требующих специфического оборудования. Сочетание этого оборудования, а также необходимых сенсорных устройств с транспортной мобильной системой также представляет серьезную проблему. В свете изложенного, создание мобильных роботов, способных перемещаться по вертикальным и другим сложным поверхностям, является фундаментальной технической проблемой, имеющей разнообразные приложения.

Развитие научного направления по созданию мобильных комбинированных роботов вертикального и горизонтального перемещения с развитой сенсорной системой обеспечит дополнительные свойства, связанные с автоматическим принятием решений о дальнейшем движении в не полностью детерминированных средах в экстремальных ситуациях. В этих случаях мобильные сложные робототехнические системы обладают элементами искусственного интеллекта. Поэтому супервизорное управление, которое применяется в настоящее время, по мере развития сенсорной системы робота, будет постепенно заменяться более сложным управлением, обеспечивающим решение поставленных задач в изменяющихся или в экстремальных условиях.

Список литературы

1. Градецкий В. Г., Рачков М. Ю., Москалев В. С. Робототехнические комплексы вертикального перемещения и их применение // Проблемы машиностроения и автоматизации. – М.: МЦИТИ, 1990. – Вып. 4 (34).
2. Fajita A., Mori K. et al. Development of inspection robot. for spherical gas storage tanks // Proc. of the 16th ISIR. Brussels, Belgium, 1986.
3. S. Nishi A. A. Robot capable of moving on a vertical wall by thrust force // Proc. of the 7th Annual Conference of the Robotic Society of Japan (part 2) Tokyo, Japan, 1989.
4. Hirose S. Study of wall climbing robot using permanent magnet disk // Proc. of the 7th Annual Conference of the Robotic Society of Japan (part 2). – Tokyo, Japan, 1989.
5. Hirose S. Terrain-adaptive quadru-track vehicle Helios II multi-media display // Journal of Robotics and Mechatronics. – Japan, 1990. – Vol. 2. – № 1.

6. Yamafuji A. Mobile robot which can shift one horizontal bar to another by using excitation of vibration // *Journal of Robotics and Mechatronics*. – Japan, 1989. – Vol. 1. – №4.
7. Karson T. A. study of robot, manipulator for the atomic energy or hot cells // *Proc. of the 7th Annual Conference of the Robotic Society of Japan (part 2)*. – Tokyo, Japan, 1989.
8. Gradetsky V., Rachkov M. Some trends in designing and application of wall climbing robots // *Proc. of the 21st ISIR*. – Copenhagen, Denmark, 1990.
9. Бешников В. Б., Гомозов А. В., Градецкий В. Г. и др. Применение роботов вертикального перемещения в противопожарных операциях / *Препринт № 469*. – М.: ИПМ АН СССР, 1990. – С. 43.
10. Нодзаки Т. Фундаментальные исследования механизмов и систем управления роботов, шагающих по стене // *2-й сборник лекций Японского научно-технического общества по робототехнике*, 1984.
11. Абарипов А. В., Аксельрод В. В., Болотник Я. П. и др. Робототехнический комплекс для вертикального перемещения // *Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика*, 1988. – № 4.
12. Градецкий В. Г., Москалев В. С., Рачков М. Ю., и др. Захватное устройство для фиксации положения транспортного средства: А. с. № 1318506 СССР // *ВН*, № 23, 1987.
13. Gradetsky V. G., Akselrod B. V. Motion of wall surface robot under external disturbances // *Proc. of the 20th ISIR*. – Tokyo, Japan, 1989.
14. Sujiyata S., Naiton S., Sato C. et al. Wall surface vehicles' with magnetic legs or vacuum legs // *Proc. of the 16th ISIR*. – Brussels, Belgium, 1986.
15. Robot Olympics, Glasgow 90. 1st International Robot Olympics // *The Turing Institute University of Strathclyde. P. Mowforth; Organiser*. – Glasgow, U. K., 1990.
16. Sugeno M. and Nishila M. Fuzzy control of car. *Fuzzy sets and systems*, 1985. – Vol. 16. – № 2.
17. Петров Б. П., Уланов Г. М., Гольденблат П. И. и др. Теория моделей в процессах управления. – М.: Наука, 1978.
18. Ульянов С. В. Нечеткие модели интеллектуальных систем управления: теоретические и прикладные аспекты (обзор) // *Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика*, 1991. – № 3.
19. Isik C., Meystel A. M. Pilot level of hierarchical controller for an unmanned mobile robot // *IEEE. Robotics and Automation*, 1988. – Vol. 4. – № 3.
20. Harris C.J., Moore C. G. Intelligent identification and control for autonomous guided vehicles using adaptive fuzzy-based algorithms // *Eng. Appl. of AI*, 1989. –Vol. 2. – № 4.
21. Рачков М. Ю. Системы очувствления промышленных роботов с пневматическими датчиками в захватах // *Вестник машиностроения*, 1989. – № 5.