

# Технология и технологические машины

УДК 681.3

## Точность управления двуногим шагающим роботом вблизи объекта работ

**А.К. Ковальчук**

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие определить точность выведения двуногого шагающего робота к объекту работ.*

**Ключевые слова:** двуногий шагающий робот, алгоритм управления, исполнительный механизм, точность управления, рабочая операция.

*The article presents the results of theoretical and experimental investigations, allowing to define the accuracy of control of a bipedal walking robot near the object of operation.*

**Keywords:** bipedal walking robot, control algorithm, actuating mechanism, control accuracy, work operation.

Режим движения двуного шагающего робота (ДШР) вблизи объекта работ (ОР) является одним из наиболее сложных и ответственных. Он обусловлен необходимостью точного определения положения и ориентации робота относительно ОР и надежной его стабилизации при наличии внешних возмущений. Для разработки систем управления (СУ) движением робота вблизи ОР надо иметь данные о требуемой точности управления. Однако такие обоснованные дан-



**Ковальчук**  
Александр Кондратьевич  
кандидат технических  
наук, доцент, директор  
МИПК МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

ные отсутствовали, что вызвало необходимость в проведении дополнительных исследований.

Рассмотрим процесс управления движением ДШР на этапе его сближения с ОР (рис. 1).

Функция управления, которую реализует оператор, связывает текущие координаты характеристической точки  $O_1$  ДШР и расстояние  $L$  от нее до ОР. Пусть  $\bar{R}_p(x_p, y_p, z_p)$  — вектор координат характеристической точки ДШР в инерциальной системе координат, а  $\bar{R}_o(x_o, y_o, z_o)$  — вектор координат ОР в той же системе координат. Тогда можно записать

$$(\bar{R}_o - \bar{R}_p) - \bar{L} = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{L}$  — вектор относительного состояния характеристической точки ДШР и ОР.

При решении задач сближения ДШР с ОР точность его выведения определяется степенью удовлетворения заданным краевым условиям в точке маневра в момент времени  $t_k$ . Эту точность характеризует вектор отклонения:

$$\Delta\bar{L}(t_k) = \bar{L}_и(t_k) - \bar{L}_p(t_k), \quad (2)$$

где  $\bar{L}_и(t_k)$  — идеальное значение вектора относительного состояния в момент времени  $t_k$ ;  $\bar{L}_p(t_k)$  — реальное значение вектора относительного состояния в момент времени  $t_k$ .

Вектор  $\Delta\bar{L}(t_k)$  может быть представлен в виде суммы вектора математического ожидания и некоторого центрированного случайного вектора [1]:

$$\Delta\bar{L}(t_k) = \bar{M}_{\Delta\bar{L}(t_k)} + \overline{\Delta\bar{L}^{(0)}}(t_k). \quad (3)$$

В качестве характеристики точности сближения можно принять корреляционную матрицу

$$K_L(t_k) = \begin{vmatrix} \delta_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_z^2 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где  $\delta_x^2, \delta_y^2, \delta_z^2$  — СКО соответствующего компонента вектора относительного состояния  $\Delta\bar{L}(t_k)$ ;  $K_{ij}(i, j = 1, 2, 3; i \neq j)$  — коэффициенты

корреляции между ошибками компонент вектора относительного состояния  $\Delta\bar{L}(t_k)$ .

Матрица  $K_L(t_k)$  характеризует области отклонения компонент вектора относительного состояния  $\Delta\bar{L}(t_k)$  от требуемых значений, т. е. определяет эллипсоид рассеяния по относительным координатам.

Будем считать, что ошибки выведения по каждой координате подчиняются нормальному закону распределения с дисперсией  $\delta_i^2$  и математическим ожиданием  $[M_i] = 0$ .

С допустимой для практики точностью можно положить, что ошибки выведения ДШР к ОР по каждой координате взаимно независимы. Тогда корреляционная матрица принимает вид

$$K_L(t_k) = \begin{vmatrix} \delta_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_z^2 \end{vmatrix} \quad (5)$$

и определяет эллипсоид рассеяния по относительным координатам.

Таким образом, требования к точности выведения ДШР к ОР могут быть заданы, если известны СКО компонентов вектора относительного положения характеристической точки  $O_1$  ДШР и ОР.

В предположении, что ошибки выведения ДШР к ОР взаимно независимы, рекомендуется их определять с учетом следующих факторов:

- кинематических параметров исполнительных органов манипуляторов ДШР;
- особенностей рабочих операций, которые должны быть выполнены ДШР с требуемой эффективностью, т. е. за заданное время и с заданной вероятностью;
- способа наблюдения, который используется оператором при выполнении рабочих операций.

Задача определения требуемой точности взаимного расположения характеристической точки ДШР и ОР может быть сведена к задаче определения допустимых величин смещения ОР в рабочей зоне манипуляторов при неподвижной характеристической точке  $O_1$  ДШР.

Критерием правомерности такой замены служит одинаковая эффективность выполне-

ния рабочих операций с помощью манипуляторов на неподвижном объекте работ при подвижном ДШР и выполнения тех же рабочих операций с помощью манипуляторов на подвижном ОР при неподвижном ДШР.

Из векторных уравнений (рис. 1)

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_o(t_k) + \Delta\bar{R}_o(t_k) &= \\
 &= \bar{R}_p(t_k) + \bar{R}_n(t_k) + [\bar{L}_n(t_k) + \Delta\bar{L}(t_k)], \\
 \bar{R}_o(t_k) + \Delta\bar{R}_o(t_k) &= \\
 &= \bar{R}_p(t_k) + \bar{R}_n(t_k) + [\bar{L}_n(t_k) + \Delta\bar{L}_n(t_k)], \\
 \bar{R}_p(t_k) + \Delta\bar{R}_p(t_k) &= \\
 &= \bar{R}_o(t_k) - [\bar{L}_n(t_k) + \Delta\bar{L}_n(t_k) - \bar{R}_n(t_k)], \\
 \bar{R}_o(t_k) + \Delta\bar{R}_o(t_k) &= \\
 &= \bar{R}_p(t_k) + \bar{R}_n(t_k) + [\bar{L}_n(t_k) + \Delta\bar{L}_n(t_k)], \\
 \bar{R}_p(t_k) + \Delta\bar{R}_p(t_k) &= \\
 &= \bar{R}_o(t_k) - [\bar{L}_n(t_k) + \Delta\bar{L}_n(t_k) - \bar{R}_n(t_k)]
 \end{aligned} \tag{6}$$

получим, что  $\bar{R}_p(t_k) = \Delta\bar{L}_n(t_k) = -\bar{R}_o(t_k)$ , где  $\bar{R}_n(t_k)$ ,  $\bar{R}_n(t_k)$  — соответственно векторы относительного положения точек крепления правого и левого манипуляторов в связанной с ДШР системе координат, а

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_n(t_k) + [\bar{L}_n(t_k) + \Delta\bar{L}_n(t_k)] &= \\
 &= [\bar{L}(t_k) + \Delta\bar{L}(t_k)], \\
 \bar{R}_n(t_k) + [\bar{L}_n(t_k) + \Delta\bar{L}_n(t_k)] &= \\
 &= [\bar{L}(t_k) + \Delta\bar{L}(t_k)].
 \end{aligned} \tag{7}$$

Геометрическая интерпретация полученного соотношения для случая линейных перемещений ДШР вблизи ОР представлена на рис. 2 [2, 3, 4, 5, 6].

Несмотря на то что аналитическому исследованию кинематики манипуляторов посвящена обширная литература, допустимые величины смещения ОР в рабочей зоне манипулятора при неподвижном ДШР в зависимости от кинематических параметров исполнительных органов манипуляторов ДШР, особенности рабочих операций, которые должны быть выполне-

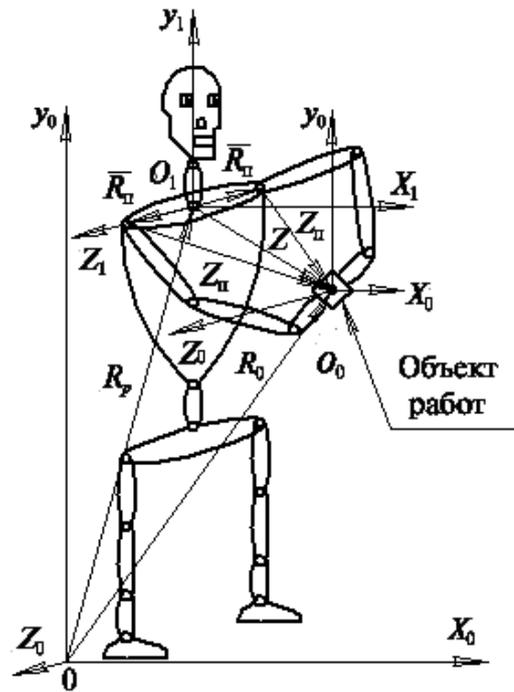


Рис. 1. Сближение ДШР с объектом работ

ны ДШР с требуемой эффективностью, способ наблюдения, используемого оператором, могут быть определены только экспериментальным путем из-за наличия в контуре управления человека-оператора.

Каждая рабочая операция, выполняемая манипулятором, может быть охарактеризована рабочим объемом, в котором возможно наиболее эффективное ее выполнение. Этот объем зачастую существенно меньше общего рабочего объема, обслуживаемого манипулятором.

Подобные рабочие объемы операций, которые в дальнейшем целесообразно называть оптимальным рабочим объемом (ОРО), являются важными параметрами, связывающими характеристики выполняемой рабочей операции с характеристиками манипулятора. ОРО операции может быть использован в качестве оценки технико-экономических характеристик биотехнической системы «оператор — ДШР — система визуального контроля».

Условием эффективного выполнения заданной рабочей операции будем считать такое расположение характеристической точки O1 ДШР относительно ОР, при котором он (объект работ) попал в оптимальный рабочий объем манипуляторов. Тогда задача определения значе-

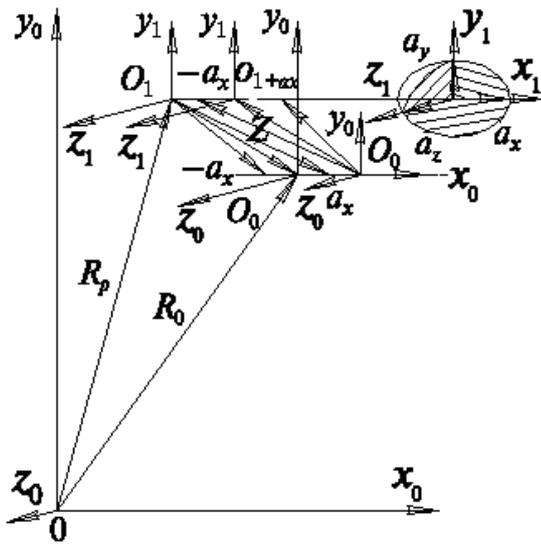


Рис. 2. К определению точности управления ДШР вблизи объекта работ

ний ошибок выведения характеристической точки ДШР к ОР может рассматриваться как задача определения размеров ОРО операции.

Количественные характеристики временных и вероятностных оценок в биотехнической системе «оператор — ДШР — система визуального контроля» могут быть использованы для определения размеров ОРО применительно к конкретным монтажным операциям. Следовательно, задача определения значений ошибок выведения характеристической точки ДШР к ОР может быть сведена к задаче определения линейных размеров ОРО. Перемещения характеристической точки ДШР в пределах ОРО не окажут существенного влияния на эффективность выполнения требуемой рабочей операции (рис. 2).

**Расчет сервисных возможностей манипуляторов ДШР**

В процессе выполнения рабочих операций манипулятором ДШР необходимо иметь возможность различным образом перемещать и ориентировать схваты относительно ОР. Однако это не всегда осуществимо из-за наличия у манипуляторов структурных и кинематических ограничений. Наиболее полно функциональные возможности манипуляторов определяются коли-

чественно с помощью коэффициента сервиса [7, 8]:

$$\Theta = \frac{\Psi}{4\pi}, \tag{8}$$

где  $\Psi$  — угол сервиса, т. е. телесный угол, внутри которого схват можно подвести к заданной точке рабочего объема. Величина среднего значения КС  $\bar{\Theta}$ , определяемая как

$$\bar{\Theta} = \frac{1}{V} \int_{(V)} \Theta dV, \tag{9}$$

характеризует усредненные функциональные возможности манипулятора в заданном рабочем объеме  $V$ .

Для анализа функциональных возможностей манипуляторов ДШР, кинематическая схема которых представлена на рис. 3, а значения кинематических параметров приведены в табл. 1, определим значение КС в любой заданной точке рабочего объема.

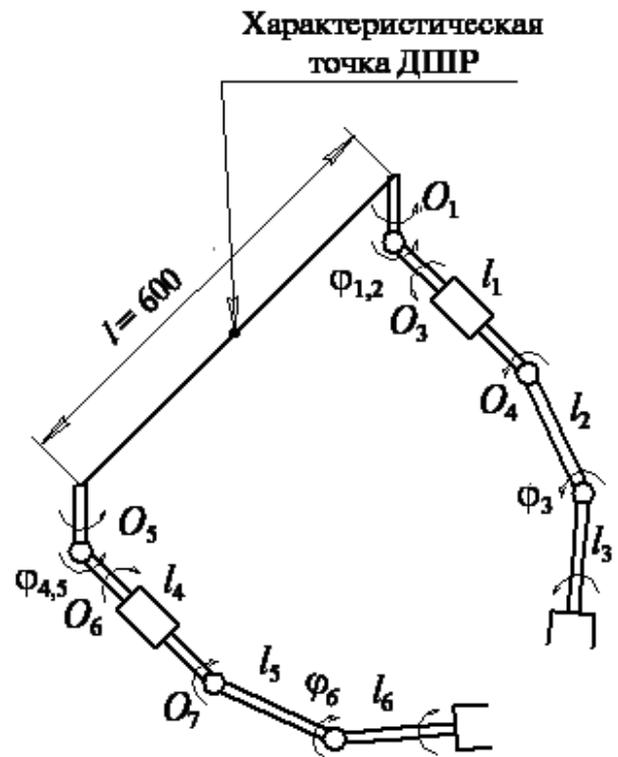


Рис. 3. Кинематическая схема манипуляторов ДШР

Таблица 1

Значения кинематических параметров манипуляторов ДШР

Левый манипулятор		Правый манипулятор	
$l_1 = 400$	$\varphi = \pm 110^\circ$	$l_1 = 400$	$\varphi = \pm 110^\circ$
$l_2 = 300$	$\varphi = \pm 110^\circ$	$l_2 = 300$	$\varphi = \pm 110^\circ$
$l_3 = 250$	$\varphi = \pm 110^\circ$	$l_3 = 250$	$\varphi = \pm 110^\circ$

В связи с тем что манипуляторы ДШР имеют кинематические ограничения в степенях подвижности, необходимо в каждой заданной точке рабочего объема и при каждой заданной ориентации схвата решать обратную задачу кинематики. Это необходимо для проверки условия невыхода текущих значений обобщенных координат манипулятора за пределы кинематических ограничений. При решении обратной задачи кинематики воспользуемся методом покоординатного спуска. В качестве минимизирующего функционала возьмем разность положений и ориентации схвата в текущей и целевой точках.

Исследования сервисных возможностей манипуляторов ДШР проводились с помощью компьютерной программы, блок-схема которой приведена на рис. 4. Она позволяет рассчитать и построить внутри рабочего объема манипуляторов поверхности с одинаковым значением коэффициента сервиса. Такие поверхности для значений КС  $\Theta = 0,1 \div 0,5$  представлены на рис. 5.

Большой практический интерес представляет знание характера распределения КС в плоскостях, перпендикулярных осям  $x$  и  $y$  и отстоящих от точки крепления манипулятора на некотором расстоянии  $\Delta x$  и  $\Delta y$  соответственно. Рассекая рабочий объем манипулятора семейством параллельных плоскостей и вычисляя характер распределения КС в каждой плоскости, можно судить о функциональных возможностях манипулятора при выполнении рабочих операций в этой плоскости. Заметим, что программа позволяет вычислить характер распределения КС манипулятора в любой плоскости его рабочего объема. На рис. 6 представлен характер распределения значений КС при значениях  $y = (600 \div 900)$  мм.

Одной из важных задач при проектировании манипуляторов ДШР является установление

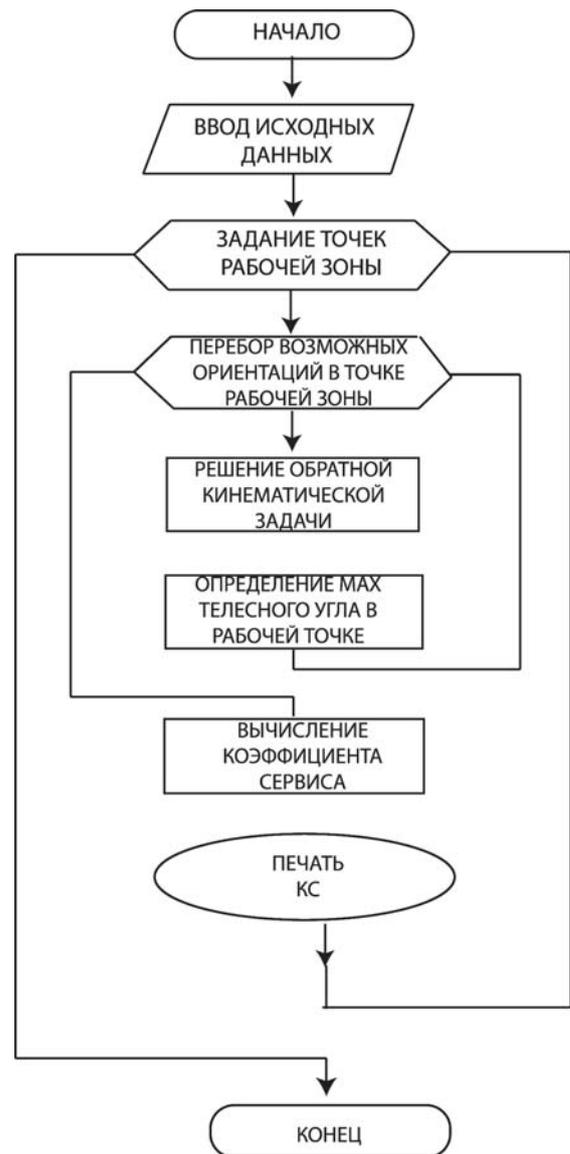


Рис. 4. Блок-схема программы вычисления значений коэффициента сервиса манипуляторов ДШР

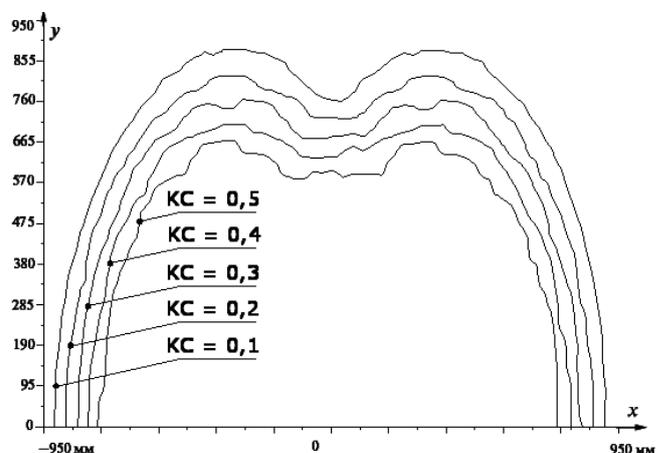


Рис. 5. Поверхности с одинаковым значением КС

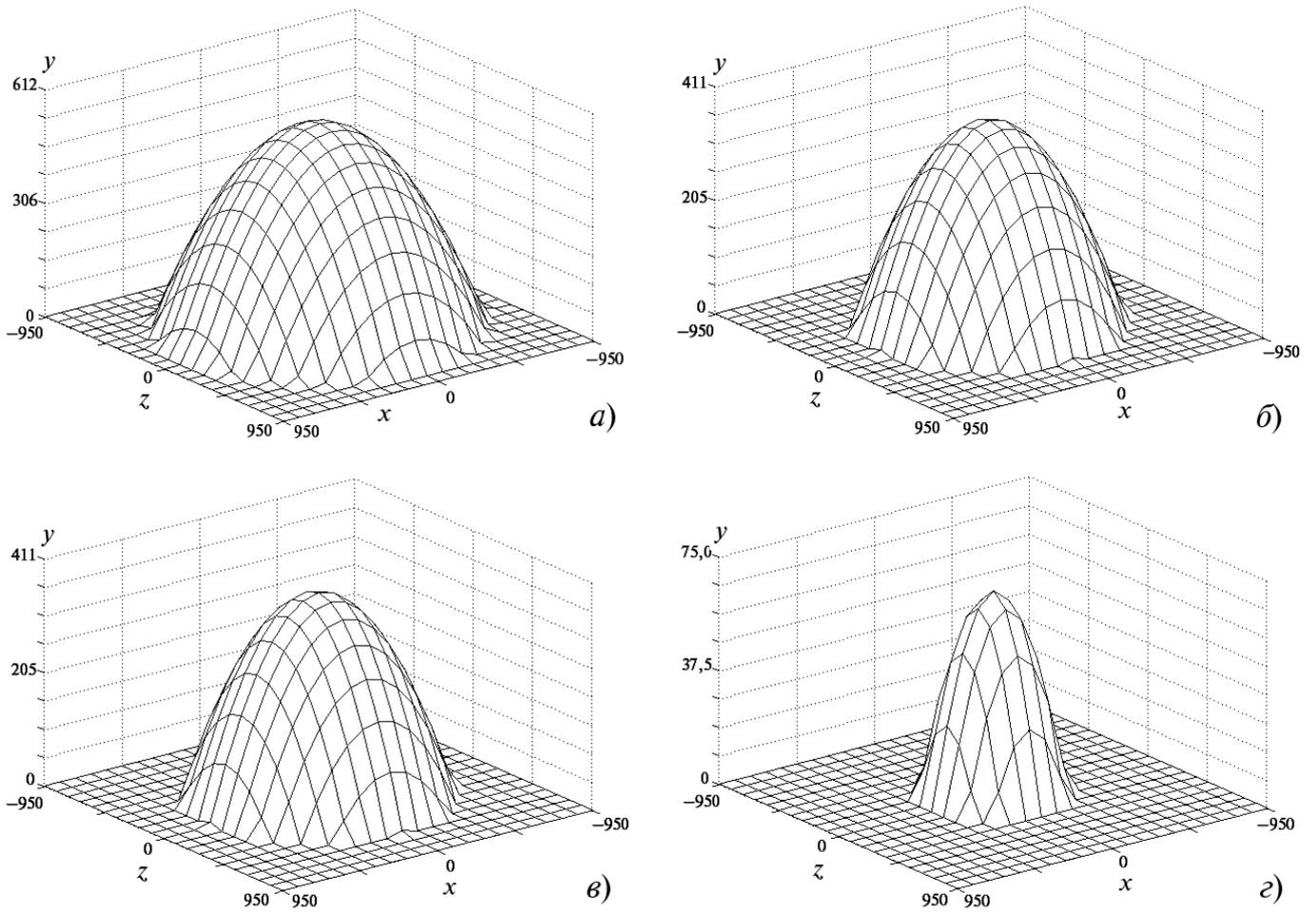


Рис. 6. Характер распределения значений  $KC = 0,5$  на параллельных плоскостях, перпендикулярных оси  $Y$  и находящихся от точки крепления манипулятора на расстоянии: а)  $y = 600$  мм; б)  $y = 700$  мм; в)  $y = 800$  мм; г)  $y = 900$  мм

таких соотношений длин звеньев манипуляторов, которые обеспечивали бы наилучшие характеристики его рабочего объема.

В качестве критерия оптимальности геометрических характеристик манипуляторов ДШР примем отношение рабочего объема  $V$  к кубу общей длины  $L$  звеньев манипулятора [2], т. е.

$$K = \frac{V}{(l_1 + l_2 + \dots + l_n)^3} = \frac{V}{L^3}. \quad (10)$$

Поскольку максимально возможным рабочим объемом манипулятора является сфера радиуса  $L$  с центром в начале координат первого звена, то  $K$  может иметь следующую максимальную величину:

$$K = \frac{4/3\pi L^3}{L^3} = \frac{4\pi}{3}. \quad (11)$$

Отсюда получим нормированный показатель качества кинематической структуры манипуляторов ДШР, величина которого изменяется от 0 до 1:

$$N = \frac{V}{4/3\pi L^3} = \frac{3V}{4\pi L^3}. \quad (12)$$

По результатам расчета рабочего объема манипуляторов ДШР получен достаточно хороший нормированный показатель качества кинематической структуры  $N = 0,4$ .

### Совместная работа двух манипуляторов ДШР

Для исследуемого ДШР, имеющего два манипулятора, практический интерес представляет расчет общего рабочего объема  $V_0$  и совме-

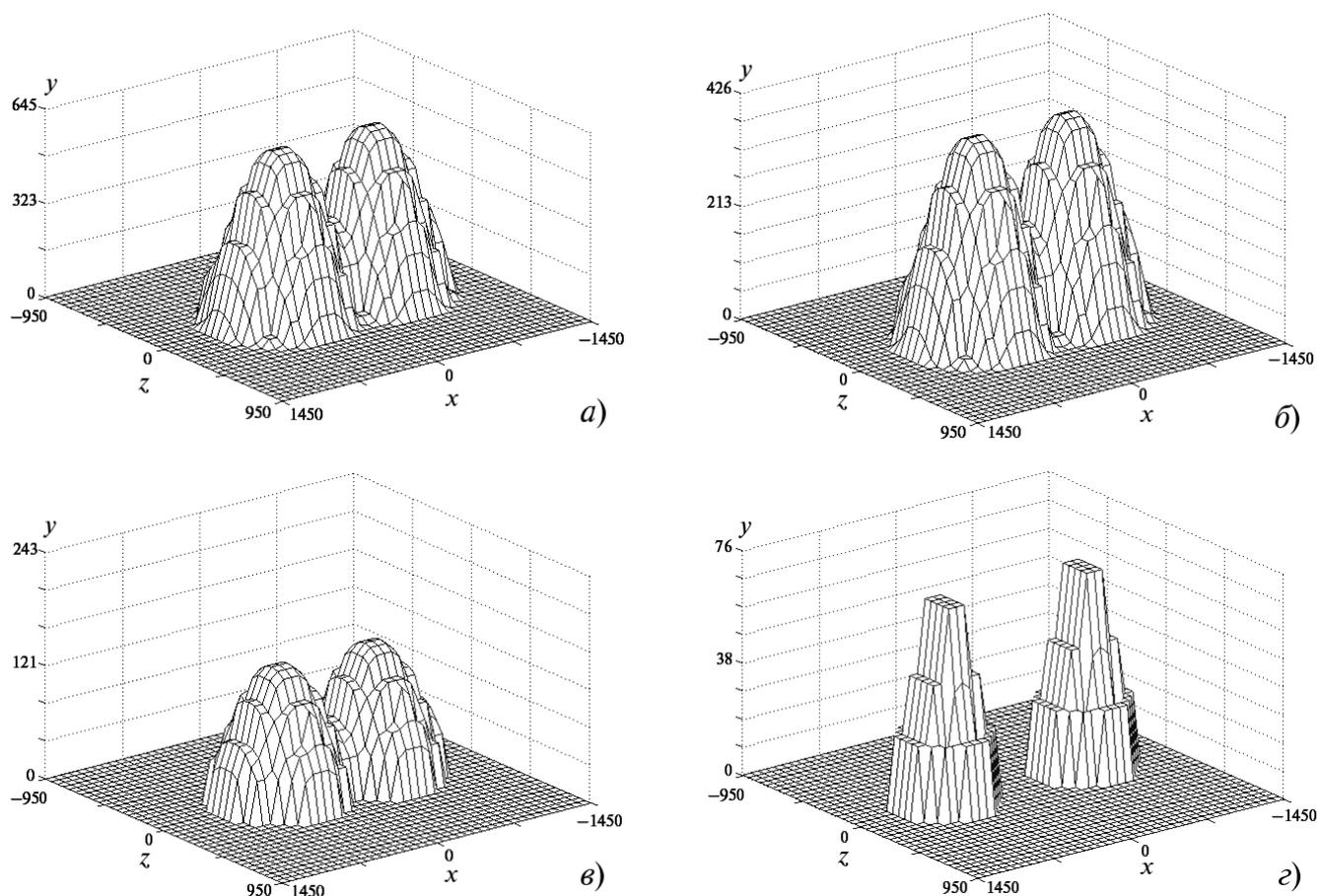


Рис. 7. Характер распределения значений  $KC = 0,5$  при совместной работе манипуляторов (ширина «плеч» ДШР равна 600 мм) на параллельных плоскостях, перпендикулярных оси  $y$  и находящихся от точки крепления манипуляторов на расстоянии: а)  $y = 600$  мм; б)  $y = 700$  мм; в)  $y = 800$  мм; г)  $y = 900$  мм

стного рабочего объема  $V_c$ , а также определение сервисных возможностей обоих манипуляторов в объеме  $V_c$ .

Очевидно, что величина  $V_c$  зависит не только от кинематических параметров манипуляторов, но и от расстояния  $l$  между точками их крепления на корпусе ДШР. Величина  $l$  (ширина «плеч» ДШР) выбирается исходя из условия наиболее эффективной совместной работы двух манипуляторов с одним общим объектом работ.

Разработанная программа позволяет рассчитать  $V_0$  и  $V_c$  манипуляторов ДШР при различных, но фиксированных значениях  $KC$ . По результатам расчета на рис. 7 представлены зависимости значений  $V_0$  и  $V_c$  при фиксированных значениях  $KC = 0,5$  и ширине «плеч»  $l = 600$  мм.

Можно рекомендовать для рассматриваемых кинематических схем манипуляторов ДШР выбирать значение  $l \cong (0,4 \div 0,6)$  м.

Используя полученные выше результаты, можно сделать некоторые выводы, касающиеся следующих эксплуатационных характеристик манипуляторов ДШР:

- оценить возможность выполнения отдельных рабочих операций, а также определить участки рабочего объема манипулятора, в котором заданные операции могут быть выполнены, т. е. определить ОРО операции;
- вычислить координаты точки крепления манипулятора относительно рабочего объема, в котором необходимо выполнять заданные рабочие операции;
- определить размеры совместного рабочего объема и распределение в нем  $KC$  для манипуляторов ДШР в зависимости от расстояния  $l$  между точками их крепления на ДШР;
- определить расстояние  $l$  в зависимости от требуемого совместного рабочего объема и требуемых значений  $KC$  в этом объеме;

— по совместному рабочему объему или общему рабочему объему, в зависимости от поставленных задач, определить требуемую точность выведения характеристической точки  $O_1$  ДШР относительно объекта работ, т. е. определить СКО вектора относительного положения характеристической точки  $O_1$  и объекта работ.

**Экспериментальное обоснование требований к точности управления ДШР вблизи объекта работ**

В работе предлагается использование временных и вероятностных оценок в биотехнической системе «оператор — ДШР — система визуального контроля» в качестве количественных характеристик для определения размеров оптимальной рабочей зоны применительно к конкретным монтажным операциям.

Временной оценкой может служить математическое ожидание  $M[T]$  времени выполнения рабочей операции в зависимости от места расположения монтируемых элементов внутри рабочей зоны манипуляторов. Существуют математическое ожидание  $M[T]_{\min}$  и дисперсия  $D[T]_{\min}$  времени монтажа и демонтажа в наиболее удобной для оператора зоне расположения монтажных элементов. По мере смещения объекта монтажа относительно центра оптимальной зоны, т. е. по мере ухудшения условий работы системы «оператор — ДШР — система визуального контроля» относительная временная оценка уменьшается  $\frac{M[T]_{\min}}{M[T]} \rightarrow 0$ .

При заданном граничном значении математического ожидания  $M[T]_{\text{гр}}$  выделяется оптимальная рабочая зона, выполнение операции в которой характеризуется наибольшей вероятностью  $P_{\max}$  работы биотехнической системы.

Оптимальная рабочая зона операции, выделенная из условия допустимой временной оценки, в этом случае дополнительно характеризуется определенной вероятностной оценкой. По мере смещения монтажного элемента относительно центра оптимальной зоны вероятность  $P$  выполнения рабочей операции

уменьшается и характеризуется относительной вероятностной оценкой  $\frac{P}{P_{\max}} \rightarrow 0$ .

Возможен второй вариант выделения оптимальной рабочей зоны операции — из обеспечения заданной граничной вероятности  $P_{\text{гр}}$  выполнения рабочей операции. В этом случае оптимальная рабочая зона операции характеризуется определенной временной граничной оценкой  $M[T]_{\text{гр}}$ .

Временные и вероятностные оценки каждой из рабочих операций при заданной циклограмме работ позволяют рассчитать время и вероятность выполнения работы биотехнической системой «оператор — ДШР — система визуального контроля» с учетом оптимальных рабочих зон операций, т. е.

$$M[T]_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n M[T]_i, P_{\text{ц}} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (13)$$

где  $M[T]_{\text{ц}}$  — время цикла;  $P_{\text{ц}}$  — вероятность выполнения цикла;  $n$  — количество последовательных операций в цикле.

Время и вероятность выполнения цикла операций находятся в следующих пределах:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n M[T]_{i \min} &\leq M[T]_{\text{ц}} = \\ &= \sum_{i=1}^n M[T]_i \leq \sum_{i=1}^n M[T]_{i \text{ гр}}, \\ \prod_{i=1}^n P_{i \text{ гр}} &\leq P_{\text{ц}} = \prod_{i=1}^n P_i \leq \prod_{i=1}^n P_{i \max \text{ ц}} = \prod_{i=1}^n P_i. \end{aligned} \quad (14)$$

Предлагается следующая последовательность экспериментального определения требований к точности выведения характеристической точки ДШР к объекту работ:

- 1) проводится анализ рабочих операций, которые должны выполнять ДШР, и среди них выбирается типовая;
- 2) при заданных кинематических параметрах манипуляторов, способе управления и способе визуального контроля проводится экспериментальное выполнение типовой рабочей операции. При этом устанавливается взаимосвязь между положением объекта в рабочей зо-

не манипуляторов и временем и вероятностью выполнения рабочей операции;

3) по экспериментальным данным строятся графические зависимости времени и вероятности выполнения типовой рабочей операции от положения объекта работ в рабочей зоне манипуляторов;

4) по требуемым значениям времени и (или) вероятности выполнения типовой рабочей операции выделяется оптимальная рабочая зона, определяющая допустимые перемещения объекта работ в рабочей зоне манипуляторов;

5) максимально допустимые линейные перемещения объекта работ, полученные исходя из заданной эффективности выполнения типовой рабочей операции, полагаются равными значениям СКО компонент вектора относительного положения характеристической точки ДШР и объекта работ.

Рассмотрим пример применения данной методики. Анализ рабочих операций, выполняемых ДШР, позволил выявить наиболее характерные из них. Они были выполнены операторами с помощью копирующего манипулятора МЭМ-5С на специально изготовленном стенде (рис. 8). Операторы работали стоя, расположившись в наиболее удобной с их точки зрения части рабочей зоны исполнительного органа манипулятора. Наблюдение за выполнением рабочих операций осуществлялось ими визуально при освещенности в рабочей зоне  $750 \div 1000$  лк. Работа выполнялась универсаль-

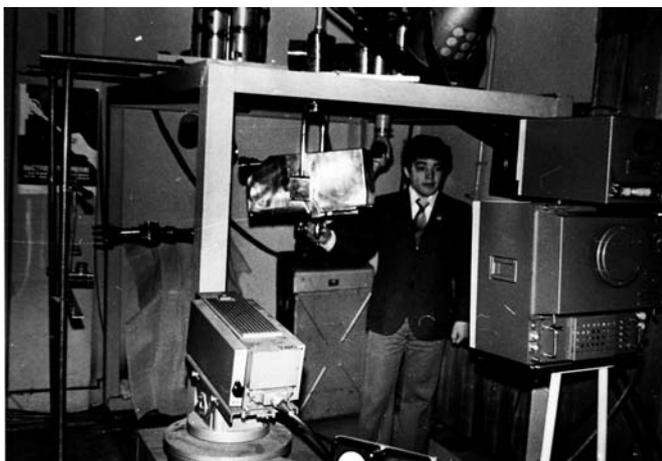


Рис. 8. Стенд для проведения экспериментальных исследований по определению эффективности выполнения рабочих операций

ным двухгубочным захватом. Задающий и исполнительный органы манипулятора находились на расстоянии 1,5 м друг от друга.

Полученные временные характеристики для рассматриваемых рабочих операций, усредненные по пяти обученным операторам, представлены на рис. 9. Математическое ожидание времени выполнения рабочей операции косвенно характеризует сложность ее выполнения с точки зрения оператора. В качестве типовой операции целесообразно выбрать операцию «средней сложности» (типа операции 5 на рис. 9).

Рассмотрим, как осуществлялось выделение оптимальной рабочей зоны для типовой операции при работе с манипулятором МЭМ—5С.

Первоначально операции выполнялись при непосредственном визуальном контроле оператора. Монтажный элемент последовательно располагался в различных точках рабочей зоны манипуляторов. В экспериментах участвовало пять обученных операторов. Каждый оператор выполнял серии операций монтажа и демонтажа, состоящие из 40 циклов. Одновременно фиксировалось число отказов оператора при выполнении серии. Под отказом понималось невыполнение операции монтажа-демонтажа из-за потери манипулятором монтажного элемента, усталости оператора и т. д. Вероятность выполнения операции рассчитывалась по формуле

$$P = \frac{n_{\text{ц}} - n_{\text{отк}}}{n_{\text{ц}}}, \quad (15)$$

где  $n_{\text{ц}}$  — общее количество повторений в цикле;  $n_{\text{отк}}$  — число отказов в цикле.

Рабочее поле, на котором закреплялся элемент монтажа, в процессе проведения эксперимента перемещалось вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  на расстоянии  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  в пределах рабочей зоны манипулятора.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить зависимости между математическим ожиданием, дисперсией времени выполнения типовой монтажной операции, вероятностью ее выполнения и расположением элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора. Эти зависимости при непосредственном наблюдении человека-оператора за ходом выполнения операции монтажа-демон-

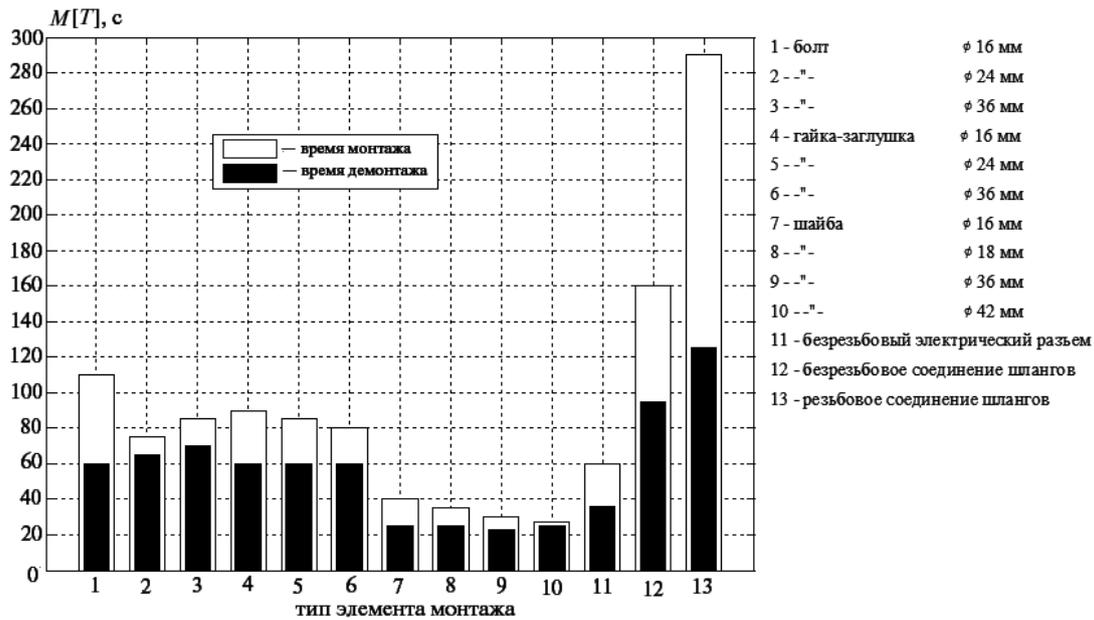


Рис. 9. Математическое ожидание времени выполнения операторами различных монтажных операций с помощью копирующего манипулятора МЭМ-5С при непосредственном наблюдении

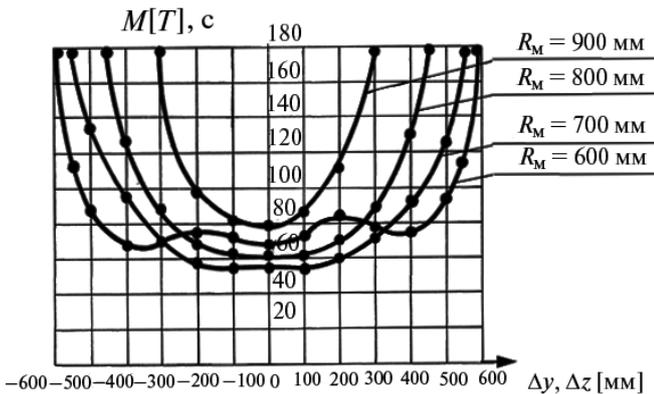


Рис. 10. Зависимость математического ожидания времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при непосредственном наблюдении

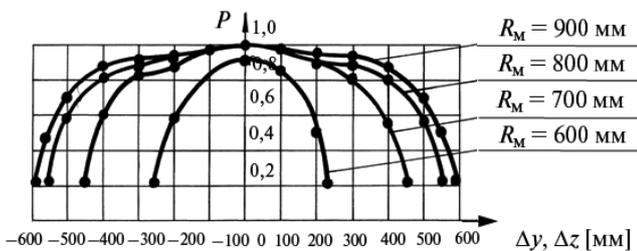


Рис. 11. Зависимость вероятности выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при непосредственном наблюдении

тажа приведены на рис. 10, 11 и 12. Из этих графиков видно, что математическое ожидание времени и вероятность выполнения рабочей операции, а также дисперсия времени выполнения, характеризующая удобства работы оператора, существенным образом зависят от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипуляторов.

Задаваясь необходимым временем и вероятностью выполнения типовой монтажной операции, можно определить тот объем, в котором

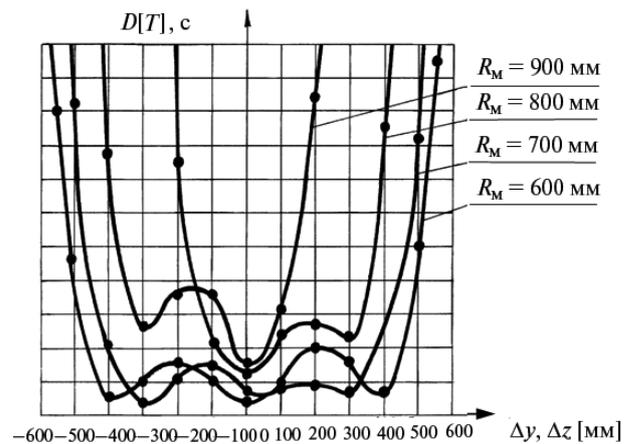


Рис. 12. Зависимость дисперсии времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при непосредственном наблюдении

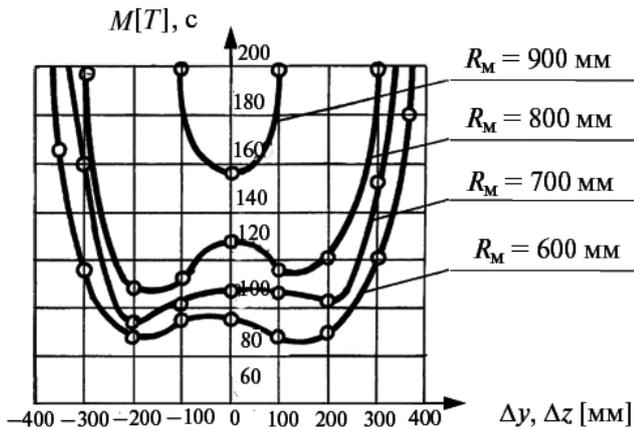


Рис. 13. Зависимость математического ожидания времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при наблюдении с помощью МТУ

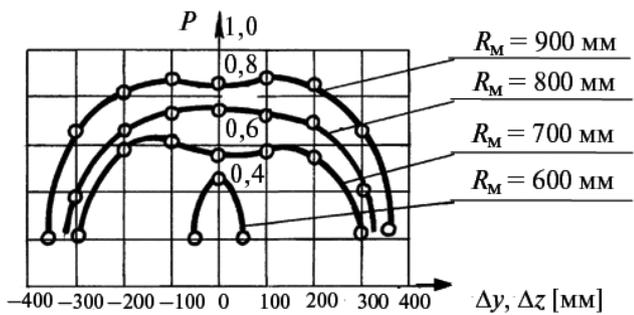


Рис. 14. Зависимость вероятности выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при наблюдении с помощью МТУ

выполнение ее возможно, т. е. определить оптимальную рабочую зону типовой монтажной операции.

Для исследования степени влияния способа наблюдения аналогичные эксперименты были проведены при наблюдении человека-оператора с помощью двух монотелевизионных установок и экспериментальной стереотелевизионной установки. Зависимости между математическим ожиданием и дисперсией времени выполнения типовой рабочей операции, вероятностью ее выполнения и расположением элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при наблюдении человека-оператора с помощью двух монотелевизионных установок представлены на рис. 13, 14 и 15, а при наблю-

дении с помощью стереотелевизионной установки — на рис. 16, 17 и 18.

Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных показывает, что матема-

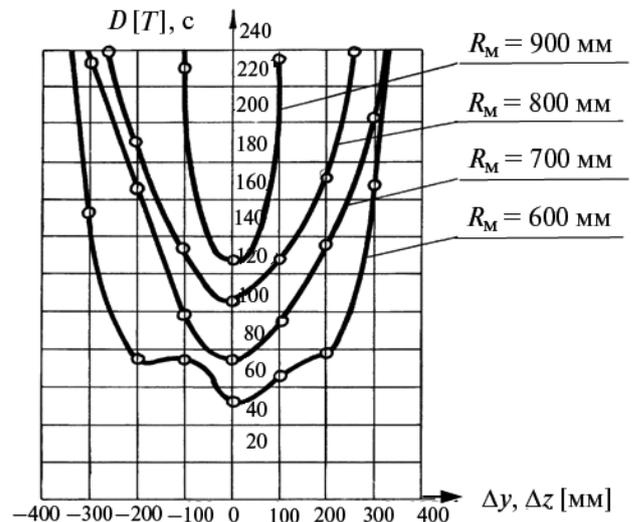


Рис. 15. Зависимость дисперсии времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при наблюдении с помощью МТУ

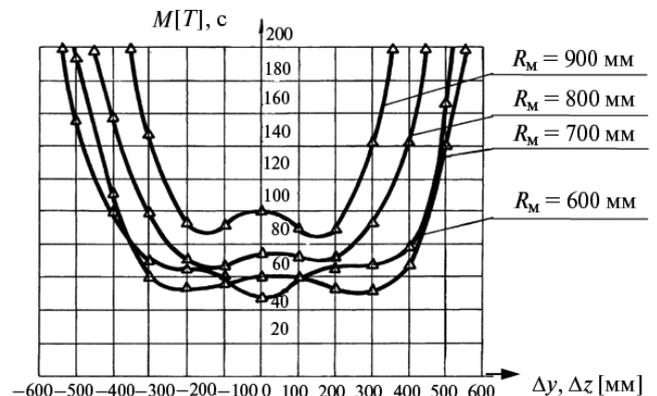


Рис. 16. Зависимость математического ожидания времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элементов монтажа в рабочей зоне манипулятора при наблюдении с помощью СТУ

тическое ожидание  $M[T]$  и дисперсия времени  $D[T]$ , а также вероятность  $P$  выполнения типовой монтажной операции в значительной степени зависят от способа наблюдения. Результаты сравнительного анализа представлены на рис. 19, 20 и 21, из которых видна степень влияния способа наблюдения на математическое ожидание, дисперсию времени и вероятность выполне-

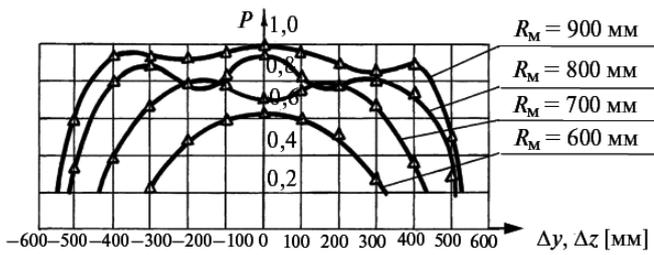


Рис. 17. Зависимость вероятности выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при наблюдении с помощью СТУ

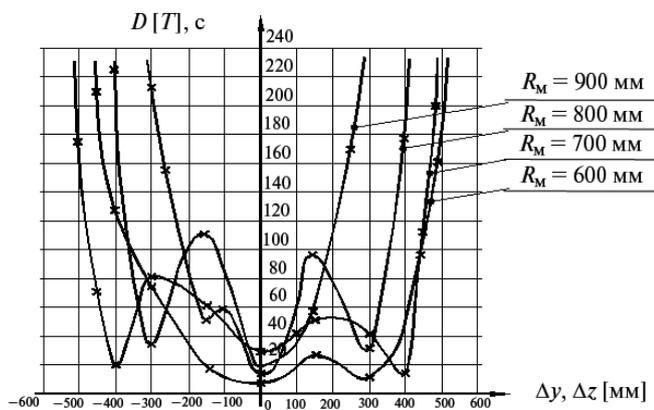


Рис. 18. Зависимость дисперсии времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при наблюдении с помощью СТУ

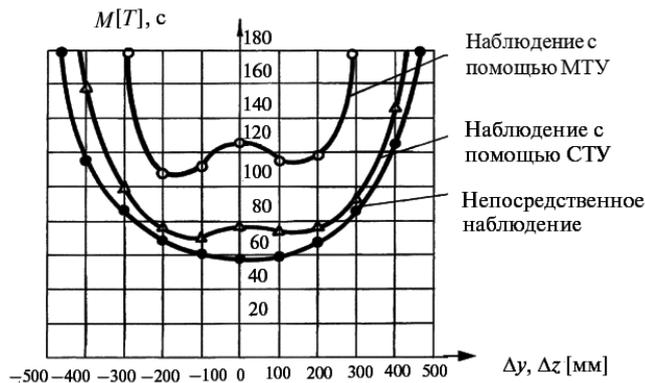


Рис. 19. Зависимость математического ожидания времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при различных способах наблюдения ( $R_M = 800$  мм)

ния типовой рабочей операции при одном и том же расположении элемента монтажа в рабочей зоне манипуляторов.

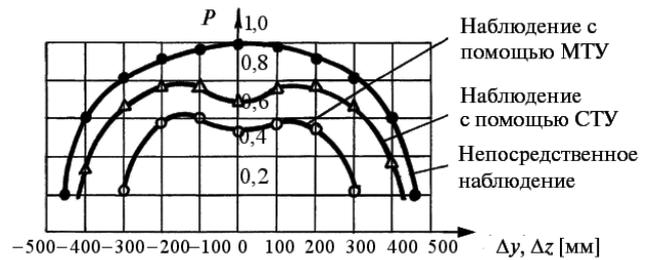


Рис. 20. Зависимость вероятности выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при различных способах наблюдения ( $R_M = 800$  мм)

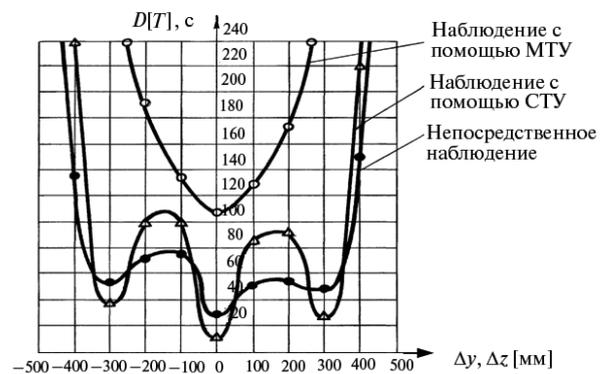


Рис. 21. Зависимость дисперсии времени выполнения типовой рабочей операции от расположения элемента монтажа в рабочей зоне манипулятора при различных способах наблюдения ( $R_M = 800$  мм)

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют по заданным математическому ожиданию времени и вероятности выполнения рабочей операции, а также в зависимости от способа наблюдения определить оптимальную рабочую зону. Сравнение оптимальных рабочих зон типовой монтажной операции, полученных для различных способов наблюдения, дало возможность установить соотношение между ними.

Пусть  $V_0$  — теоретически возможная оптимальная рабочая зона типовой монтажной операции;  $V_1$  — оптимальная рабочая зона типовой монтажной операции при непосредственном наблюдении;  $V_2$  — оптимальная рабочая зона типовой монтажной операции при наблюдении с помощью стереотелевизионной установки;  $V_3$  — оптимальная рабочая зона типовой монтажной операции при наблюдении с помощью монотелевизионной установки.

На основании экспериментальных и расчетных данных были получены следующие соотношения между этими объемами:

$$K_1 = \frac{V_1}{V_0} = 0,7 - 0,75, \quad K_2 = \frac{V_2}{V_0} = 0,55 - 0,65,$$

$$K_3 = \frac{V_3}{V_0} = 0,2 - 0,3.$$

Опираясь на полученные значения коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$ , исходя из заданных кинематических схем манипуляторов, способов наблюдения и характеристик рабочих операций, можно сформулировать в первом приближении требования к точности выведения ДШР к объекту работ.

Определенные экспериментальным путем значения (табл. 2) позволяют сделать вывод о том, что к точности управления ДШР вблизи объекта работ предъявляются жесткие требования. Отсутствие в части ячеек таблицы цифровых значений означает, что выполнение манипулятором ДШР рабочей операции за заданное время  $M[T]$  и с заданной вероятностью  $P$  при использовании указанных способов наблюдения невозможно.

Таблица 2

Требуемая точность выведения ДШР к объекту работ

$M[T]$ [с]	$P$	Условия наблюдения	$\sigma_x$ [с]	$\sigma_y$ [с]	$\sigma_z$ [с]
60	1	Непосредственное наблюдение	0,03	0,1	0,1
		Наблюдение с помощью стерео-TV	—	—	—
		Наблюдение с помощью моно-TV	—	—	—
	0,75	Непосредственное наблюдение	0,05	0,2	0,2
		Наблюдение с помощью стерео-TV	—	—	—
		Наблюдение с помощью моно-TV	—	—	—
	0,5	Непосредственное наблюдение	0,08	0,25	0,25

$M[T]$ [с]	$P$	Условия наблюдения	$\sigma_x$ [с]	$\sigma_y$ [с]	$\sigma_z$ [с]
60	0,5	Наблюдение с помощью стерео-TV	—	—	—
		Наблюдение с помощью моно-TV	—	—	—
100	1	Непосредственное наблюдение	0,05	0,2	0,2
		Наблюдение с помощью стерео-TV	—	—	—
		Наблюдение с помощью моно-TV	—	—	—
	0,75	Непосредственное наблюдение	0,1	0,3	0,3
		Наблюдение с помощью стерео-TV	0,08	0,2	0,2
		Наблюдение с помощью моно-TV	—	—	—
	0,5	Непосредственное наблюдение	0,12	0,4	0,4
		Наблюдение с помощью стерео-TV	0,1	0,3	0,3
		Наблюдение с помощью моно-TV	0,03	0,1	0,1
140	1	Непосредственное наблюдение	0,1	0,2	0,2
		Наблюдение с помощью стерео-TV	—	—	—
		Наблюдение с помощью моно-TV	—	—	—
	0,75	Непосредственное наблюдение	0,13	0,35	0,35
		Наблюдение с помощью стерео-TV	0,1	0,3	0,3
		Наблюдение с помощью моно-TV	—	—	—
	0,5	Непосредственное наблюдение	0,15	0,45	0,45
		Наблюдение с помощью стерео-TV	0,12	0,35	0,35
		Наблюдение с помощью моно-TV	0,05	0,1	0,1

## Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют рекомендовать следующую методику определения требований к точности управления ДШР вблизи ОР.

1. По известной кинематической схеме манипуляторов ДШР с использованием разработанной программы рассчитываются размеры рабочего объема, в котором возможно выполнение рабочих операций с требуемым значением КС. Затем эти размеры корректируются с помощью коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  в зависимости от применяемого способа наблюдения.

2. Линейные размеры скорректированного рабочего объема манипулятора (при работе только одного манипулятора ДШР) или линейные размеры скорректированного совместного рабочего объема (при работе двух манипуляторов с одним общим ОР) с требуемым значением КС принимаются в качестве главных полуосей эллипсоида рассеяния по относительным координатам характеристической точки  $O_1$  ДШР и ОР, т. е. определяют возможную ошибку выведения ДШР к ОР.

3. По известным значениям максимальной ошибки выведения ДШР к ОР и известным параметрам кинематической схемы ДШР рассчитываются требования к точности управления исполнительной системой робота.

4. По графическим зависимостям, представленным на рис. 10—21, определяются минимальное время и максимальная вероятность

выполнения типовой монтажной операции в зависимости от требуемого значения КС в рабочем объеме. При этом учитывается способ наблюдения, который использует оператор при выполнении монтажных операций (непосредственное наблюдение, стерео- или монотелевизионные установки). При заданной циклограмме работ эти данные используются для расчета времени и вероятности выполнения ДШР монтажных работ.

## Список литературы

1. Космические и траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / Под ред. П.А. Агаджанова, В.Е. Дулевича, А.А. Коростелева. М.: Сов. радио, 1969. 504 с.
2. Воробьев Е.И. и др. Механика промышленных роботов. Учебное пособие для вузов: В 3-х кн. / Под ред. К.В. Фролова и Е.И. Воробьева // Кн. 3. Основы конструирования. М.: Высшая школа, 1989. 383 с.
3. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978. 348 с.
4. Ушаков В.И. Качественный анализ зоны обслуживания манипулятора // Изв. вузов, Машиностроение. М., 1977. № 6. С. 133—136.
5. Ушаков В.И., Суетин В.А. Моделирование зоны обслуживания // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. М., 1978. № 291. С. 26—30.
6. Лобачев В.И., Ковальчук А.К., Горелов Л.В. Исследование оптимальных рабочих зон монтажных операций, выполняемых копирующим манипулятором // Межвуз. сб. статей. М., ВЗМИ, 1978. № 11. С. 97—100.
7. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 344 с.
8. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. 480 с.

Статья поступила в редакцию 29.11.2010 г.