

В. Л. Афонин, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., afoninwl@rambler.ru,

Л. В. Гаврилина, науч. сотр., griboedova04@mail.ru,

А. Н. Смоленцев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., alexeism1@yandex.ru,

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), г. Москва

Позиционно-силовое управление шестикоординатным промышленным роботом при обработке сложных поверхностей

При выполнении некоторых технологических операций многокоординатными промышленными роботами требуется одновременно управлять перемещением исполнительного органа и развиваемым усилием. При выполнении сборочных операций (например, вала с втулкой) необходимо выполнять свободное перемещение вала вдоль отверстия втулки и обеспечивать минимальное давление на стенки отверстия. При выполнении операций обработки сложных поверхностей деталей одновременно требуется обеспечивать перемещение инструмента по поверхности с заданной скоростью и осуществлять дозированное давление на поверхность.

Невозможно одновременно по одной и той же координате управлять силой и перемещением, поэтому либо необходимо осуществлять переключение с одного способа управления на другой, либо способы управления осуществлять различными приводами и по различным управляемым координатам исполнительного механизма. В многокоординатных роботах эта задача осложняется тем, что для управления по одной из декартовых координат перемещением исполнительного органа, а по другой — силой требуется одновременно управлять взаимосвязанными обобщенными координатами механизма робота.

В представленной работе излагается решение задачи управления шестикоординатным промышленным роботом, в котором осуществлено разделение степеней подвижности на управление по силе и на позиционное управление перемещением по траектории.

Для выполнения поставленной задачи применительно к задачам обработки сложных поверхностей вводятся дополнительные переменные параметры, определяющие положение режущей кромки на режущей поверхности, что позволяет расширить зону обслуживания робота при отборе, например, одной из координат для управления усилием давления.

Данная задача рассматривается на примере шестикоординатного промышленного робота при выполнении операции обработки сложной поверхности, когда требуется осуществлять программное перемещение инструмента с заданной скоростью по траектории на поверхности и одновременно осуществлять управляемое давление инструмента на поверхность.

Ключевые слова: позиционно-силовое управление, газотурбинные двигатели (ГТД), промышленный робот, лопатка ГТД

Выполнение сборочных операций промышленными роботами требует одновременного управления перемещением и заданным усилием. Многие другие технологические операции следует выполнять, регулируя также силовое воздействие. Так, при обработке сложных поверхностей требуется выполнять перемещение по траектории с заданной скоростью по поверхности и одновременно создавать управляемую силу давления инструмента на поверхность. Сложность одновременного управления перемещением и усилием объясняется тем, что невозможно одновременно и независимо управлять перемещением и силой по одной координате. Данное утверждение вытекает из второго закона Ньютона

$$F(t) = m\ddot{q}(t) + F_n, \quad (1)$$

где $F(t)$ — сила, развиваемая исполнительным приводом; $\ddot{q}(t)$ — ускорение, развиваемое приводом; F_n — внешнее воздействие; m — масса перемещаемого объекта.

Из данного уравнения следует, что нельзя одновременно и независимо управлять силой $F(t)$,

развиваемой приводом, и ускорением $\ddot{q}(t)$, соответственно скоростью $\dot{q}(t)$ и положением $q(t)$. При $q(t) = \text{const}$ можно управлять силой $F(t)$, создавая давление на упор, при этом будет выполняться условие $F_n = F(t)$. Для следящей системы, когда требуется обеспечивать программное движение $q(t)$, сила $F(t)$ является переменной и формируется таким образом, чтобы обеспечивать программное движение для $q(t)$ и противодействовать внешнему воздействию F_n .

Поэтому для роботов, имеющих взаимосвязанные степени подвижности, для выполнения силовых операций требуется распределять степени подвижности на силовые и позиционные, когда одна группа степеней подвижности обеспечивает позиционное управление, а другая — силовое.

Первые примеры позиционно-силового управления применительно к системам управления роботами изложены в работах В. С. Кулешова и М. Вукобратовича [1]. Наиболее полная информация о работах, посвященных позиционно-силовому управлению, изложена в работе [2]. В механизмах параллельной

структуры позиционно-силовое управление может быть реализовано путем установки в одних сочленениях приводов, обеспечивающих управление положением выходной платформы, а в отдельных свободных сочленениях — приводов, обеспечивающих управление моментом [3—5]. В данном случае управление моментом выполняет функцию разгрузки механизма от статических неуравновешенных моментов. Это позволяет повысить быстродействие при выполнении перемещения выходной платформы.

Управление перемещением и усилием при движении по сложной поверхности

Автоматизация операции шлифования и полирования сложной поверхности, в частности обработка пера лопаток газотурбинного двигателя (ГТД), возможна с использованием промышленных роботов, оснащенных силомоментными датчиками и встроенной в состав комплекса системой контроля геометрических параметров и качества обрабатываемой поверхности. В зависимости от соотношения массы обрабатываемой детали и инструмента совместно с его приводом выбирается один из способов обработки:

1) перемещение детали, закрепляемой в захватном устройстве робота, относительно неподвижного инструмента. Выполняется, когда масса детали много меньше массы инструмента совместно с его приводом;

2) перемещение инструмента совместно с его приводом относительно неподвижно закрепленной детали [6] выполняется, когда масса инструмента совместно с его приводом много меньше массы детали.

Второй способ обработки применяется, как правило, при обработке гребных винтов, лопастей турбин, а также моноколес крупных ГТД. В представленной работе рассматривается первый способ обработки, когда инструмент совместно с приводом закрепляется неподвижно относительно робота, а обработка пера лопаток ГТД выполняется перемещением лопатки относительно неподвижного инструмента.

Рассмотрим решение данной задачи на примере промышленного робота (рис. 1, а), оснащенного силомоментными датчиками. В качестве инструмента рассматривается шлифовальный круг с торовой режущей поверхностью.

Использование режущего инструмента, в частности, шлифовального круга, имеющего сложную режущую поверхность, позволяет выполнять операцию обработки в различных

точках режущей поверхности. В данном случае одна либо несколько степеней подвижности используются для управления усилием, а для обеспечения перемещения и ориентации исполнительного органа можно использовать дополнительные переменные параметры, определяющие положение режущей кромки на режущей поверхности инструмента, обеспечивая при этом ограниченным числом управляемых степеней подвижности робота доступность режущей кромки инструмента ко всем точкам обрабатываемой поверхности.

Положение режущей кромки на режущей поверхности задается положением сопровождающего трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$ (рис 1, б), ось τ направляется по скорости относительного перемещения обрабатываемой поверхности и инструмента, ось ν — по нормали к обрабатываемой и режущей поверхностям, ось β направляется по режущей кромке.

В этом случае перемещение режущей кромки по обрабатываемой поверхности, кроме управляемых координат робота $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T$, определяется параметрами $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$, которые задают ее положение на режущей поверхности.

Положение подвижного трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$, связанного с режущей кромкой, на торовой режущей поверхности относительно системы координат инструмента $(XYZ)_{И1}$ определяется следующими параметрами (рис. 1, б): R — радиус центра образующей торового круга, r — радиус образующей круга. Углы θ_1, θ_2 и θ_3 являются переменными и определяют угловую ориентацию подвижного трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$ относительно системы координат инструмента $(XYZ)_{И1}$.

Рассмотрим матрицы, определяющие положение подвижного трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$ относительно системы координат инструмента $(XYZ)_{И1}$ при повороте последовательно на углы θ_1, θ_2 и θ_3 . Матрицы преобразования координат имеют вид

$${}^{И1}\mathbf{C}_{\theta_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -C(\theta_1) & +S(\theta_1) & 0 \\ -S(\theta_1) & -C(\theta_1) & 0 \end{bmatrix};$$

$${}^{\theta_1}\mathbf{C}_{\theta_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C(\theta_2) & S(\theta_2) \\ 0 & -S(\theta_2) & C(\theta_2) \end{bmatrix};$$

$${}^{\theta_2}\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} C(\theta_3) & 0 & S(\theta_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ -S(\theta_3) & 0 & C(\theta_3) \end{bmatrix},$$

где $S(\theta_i) = \sin\theta_i$, и $C(\theta_i) = \cos\theta_i$.

Выполнив последовательное перемножение матриц ${}^{I1}C_{01}$, ${}^{01}C_{02}$, ${}^{02}C_i$, получим матрицу преобразования координат, определяющую угловые преобразования $(\tau\nu\beta)_i$ относительно системы координат инструмента $(XYZ)_{II1}$

$${}^{I1}C_i = \begin{bmatrix} -C(\theta_2)S(\theta_3) & -S(\theta_2) & C(\theta_2)C(\theta_3) \\ -C(\theta_1)C(\theta_3) - S(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3) & S(\theta_1)C(\theta_2) & -C(\theta_1)S(\theta_3) + S(\theta_1)S(\theta_2)C(\theta_3) \\ -S(\theta_1)C(\theta_3) + C(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3) & -C(\theta_1)C(\theta_2) & -S(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_1)S(\theta_2)C(\theta_3) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

С учетом положения начала координат $(\tau\nu\beta)_i$ в системе координат $(XYZ)_{II1}$ матрица, определяющая положение $(\tau\nu\beta)_i$ в системе координат $(XYZ)_{II1}$, принимает вид

$${}^{II1}A_i = \begin{bmatrix} -C(\theta_2)S(\theta_3) & -S(\theta_2) & C(\theta_2)C(\theta_3) & rS(\theta_2) \\ -C(\theta_1)C(\theta_3) - S(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3) & S(\theta_1)C(\theta_2) & -C(\theta_1)S(\theta_3) + S(\theta_1)S(\theta_2)C(\theta_3) & -(R + C(\theta_2)r)S(\theta_1) \\ -S(\theta_1)C(\theta_3) + C(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3) & -C(\theta_1)C(\theta_2) & -S(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_1)S(\theta_2)C(\theta_3) & (R + C(\theta_2)r)C(\theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для доступа в проблемные участки лопатки инструмент совместно с приводом комплектуется с роботом в соответствии с рис. 2.

Угол наклона φ (рис. 2) позволяет обрабатывать спинку и корыто пера лопатки конической поверхностью режущей поверхности инструмента, что позволяет увеличить объем снимаемого слоя материала в единицу времени.

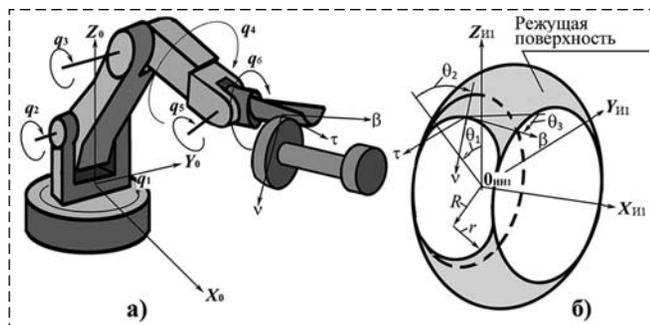


Рис. 1. Промышленный робот и представление режущей поверхности инструмента:

a – робот совместно с инструментом; *б* – шлифовальный круг, имеющий торовую режущую поверхность

Fig. 1. Industrial robot and idea of the cutting tool surface:

a – a robot together with a tool; *b* – a grinding wheel having a torus cutting surface

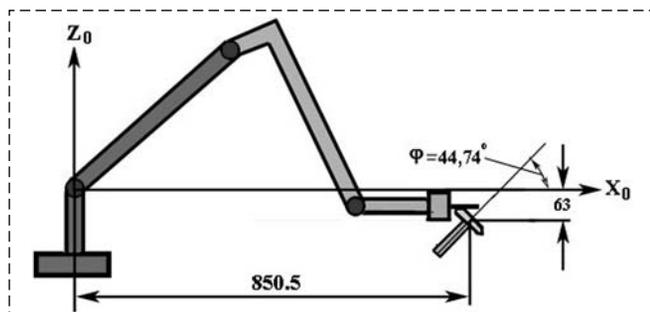


Рис. 2. Компонка робота с лопаткой и инструмента с его приводом

Fig. 2. Arrangement of a robot with a shovel and a tool with its drive

Для упрощения матриц преобразования координат и определения положения $(\tau\nu\beta)_i$ относительно системы координат робота $(XYZ)_0$ инструмент располагается относительно робота таким образом, чтобы плоскость (XZ) системы координат инструмента $(XYZ)_{II}$ и плоскость (XZ) системы координат робота $(XYZ)_0$ совпадали. В этом случае матрица преобразования координат ${}^0A_{II}$ принимает следующий вид

$${}^0A_{II} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi & 850,5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi & -63 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Так как для инструмента радиусы R и r являются постоянными параметрами, положение сопровождающего трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$ на режущей поверхности однозначно определяется переменными параметрами $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$.

Таким образом, если одну из обобщенных координат робота использовать, например, для управления силовым воздействием, то переменные параметры θ_1, θ_2 и θ_3 позволяют выполнять обработку сложной поверхности детали, осуществляя перемещение детали оставшимися обобщенными координатами робота в различные точки режущей поверхности инструмента, определяемые, в том числе, переменными параметрами θ_1, θ_2 и θ_3 .

Рассмотрим алгоритм определения обобщенных координат и управления роботом (см. рис. 1), у которого привод обобщенной координаты q_5 осуществляет управление моментом M_5 , создавая управляемое давление на обрабатываемую поверхность, которое необходимо

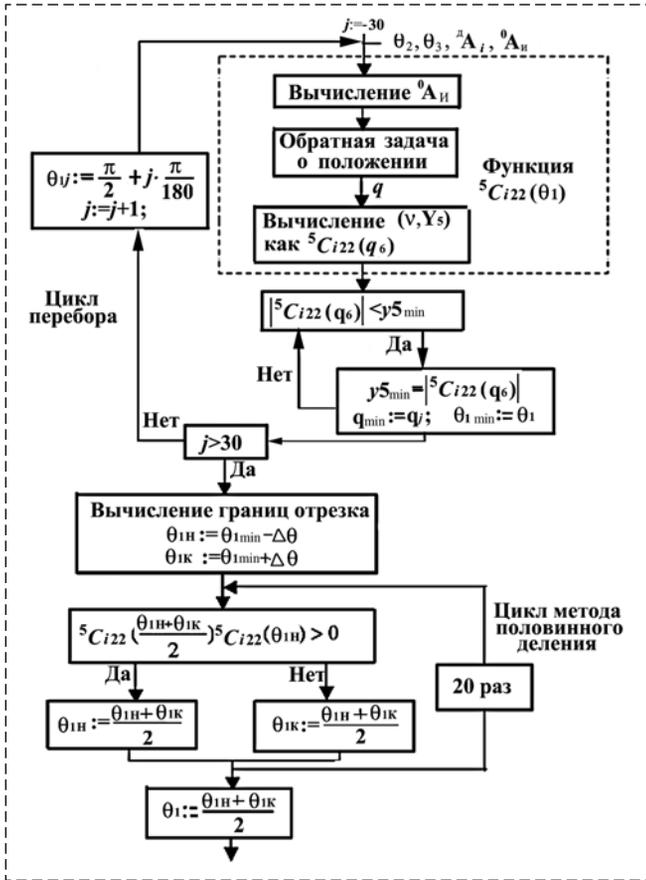


Рис. 3. Алгоритм определения управляемых координат робота и дополнительных параметров
 Fig. 3. Algorithm for determining controlled robot coordinates and additional parameters

при выполнении, например, операции полирования и размерного шлифования.

Работа данного алгоритма (рис. 3) включает следующую последовательность шагов. Входной информацией является положение трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$ в системе координат детали и перемещение его по поверхности с заданной скоростью.

Положение каждой точки поверхности определяется положением сопровождающего трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$ относительно системы координат детали $(XYZ)_Д$ и задается матрицей ДA_i вида

$${}^ДA_i = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & X_i \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & Y_i \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где матрица направляющих косинусов имеет

$$\text{вид } {}^ДC_i = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}.$$

Первый столбец матрицы направляющих косинусов определяет направляющие косинусы вектора τ , который совпадает с вектором скорости относительного движения детали и инструмента, второй столбец — это направляющие косинусы вектора ν , который направлен по нормали к поверхности, и третий столбец — направляющие косинусы вектора β — обычно представляет направление режущей кромки инструмента. Четвертый столбец матрицы ДA_i определяет положение начала координат сопровождающего трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$ в системе координат $(XYZ)_Д$.

Для удобства преобразований и нахождения управляемых обобщенных координат робота $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T$ систему координат детали $(XYZ)_Д$ целесообразно совместить с системой координат шестого звена робота (рис. 4).

Математически перемещение детали относительно инструмента характеризуется последовательным совпадением трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$, определяющего положение точек траектории на обрабатываемой поверхности с положением трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$, определяющего положение режущей кромки на режущей поверхности.

Далее определяется обратная матрица iA_Д . Взаимосвязь между матрицей, определяющей положения подвижного трехгранника $(\tau\nu\beta)_i$, и параметрами $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$, определяющими положение режущей кромки на режущей поверхности, определяется матричным уравнением

$${}^0A_{ii} {}^iA_i(\theta) {}^iA_Д = {}^0A_Д(\mathbf{q}). \quad (6)$$

Система уравнений (6) содержит девять неизвестных, определяющих положение режущей кромки на обрабатываемой поверхности $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, \theta_1, \theta_2$ и θ_3 .

Если одна из степеней подвижности робота (в рассматриваемом роботе это 5-я степень подвижности) используется для обеспечения

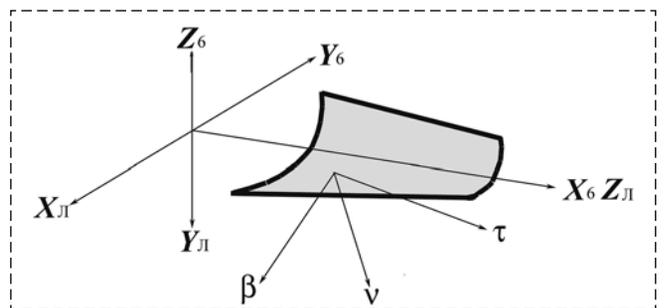


Рис. 4. Системы координат детали, трехгранника режущей кромки и шестого звена робота
 Fig. 4. Coordinate system of the workpiece, trihedron of the cutting edge and the sixth link of the robot

давления по нормали на обрабатываемую поверхность, то положение режущей кромки на обрабатываемой поверхности будет зависеть от восьми параметров $q_1, q_2, q_3, q_4, q_6, \theta_1, \theta_2$ и θ_3 . При этом q_5 будет зависеть от q_1, q_2, q_3, q_4, q_6 .

Условие управления силой давления по нормали к обрабатываемой поверхности моментом 5-го привода робота PUMA

Для обеспечения давления на обрабатываемую поверхность с использованием привода

5-й степени подвижности необходимо, чтобы ось 5-й степени подвижности была перпендикулярна нормали в i -й точке на обрабатываемой и режущей поверхностях v_i .

Условие перпендикулярности обеспечивается в том случае, если скалярное произведение вектора 0Y_5 (вектора, связанного с 5-й осью робота, представленного в неподвижной системе координат $(XYZ)_0$) и вектора 0v_i (вектора, связанного с общей нормалью обрабатываемой и режущей поверхности), также представленного в неподвижной системе координат $(XYZ)_0$, будет равно нулю.

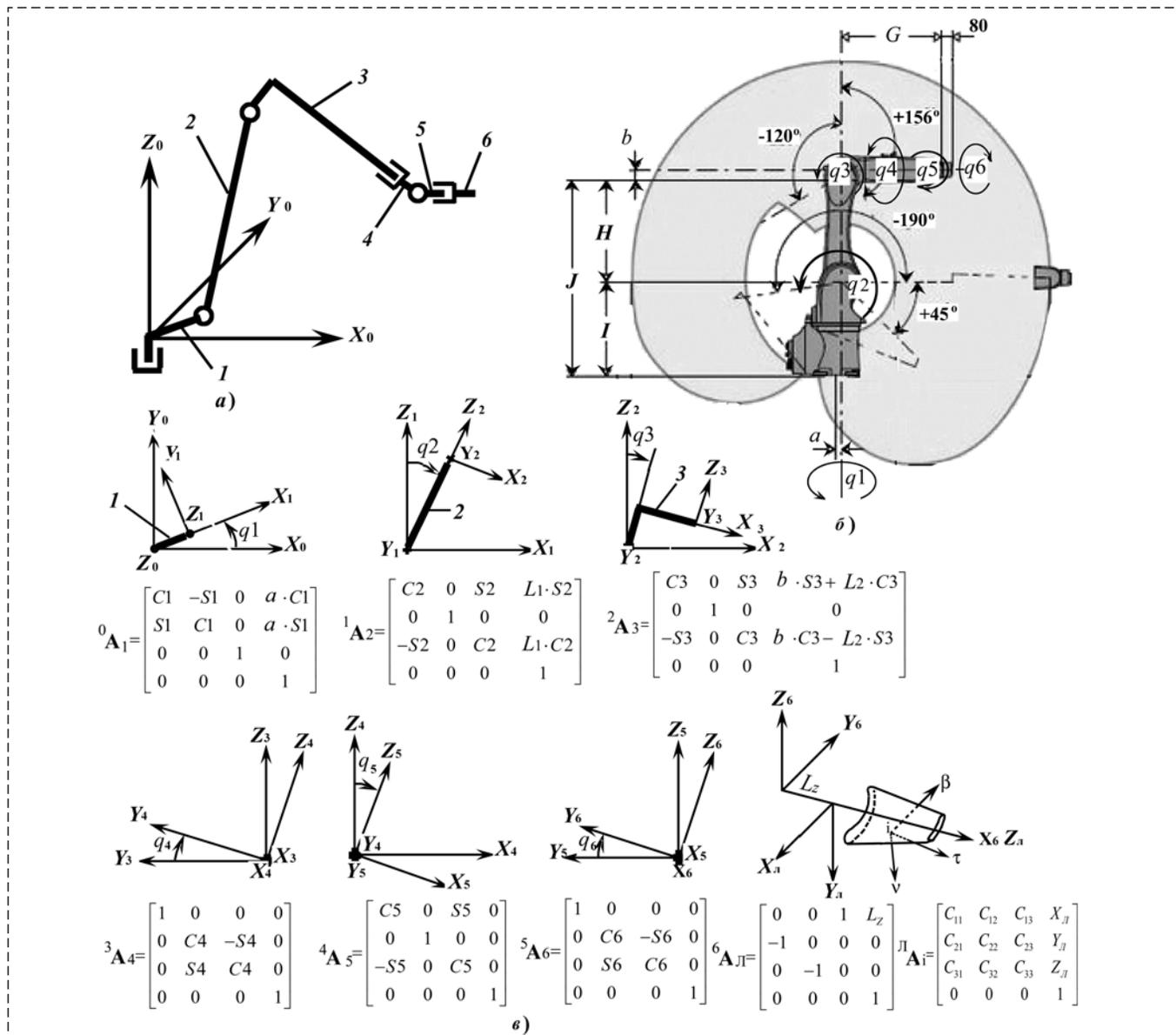


Рис. 5. Кинематическая схема робота KR10 R1100:

a — кинематическая схема; b — зона обслуживания робота KR10 R1100; c — матрицы преобразования координат, где $Cn = \cos(q_n), S\alpha = \sin(q_n), a = 25$ мм, $L1 = 455$ мм, $b = 35$ мм, $L2 = 420$ мм

Fig. 5. Cinematic diagram of the robot KR10 R1100:

a — Kinematic scheme; b — Service area of the robot KR10 R1100; c — Coordinates transformation matrix, where $Cn = \cos(q_n), S\alpha = \sin(q_n), a = 25$ mm, $L1 = 455$ mm, $b = 35$ mm, $L2 = 420$ mm

Это выражение не меняется при переходе к 5-й системе координат

$$({}^5Y_5, {}^5v_i) = 0, \quad (7)$$

где формулу для левой части $({}^5Y_5, {}^5v_i)$ можно извлечь из матрицы поворота 5C_i , в которой второй столбец 5v_i представляет собой направляющие косинусы вектора нормали по осям X_5 , Y_5 и Z_5 . Второй элемент второго столбца этой матрицы — направляющий косинус вектора нормали по оси Y_5 , иначе говоря, скалярное произведение единичного вектора $e_{y_5} = {}^5Y_5 = (0, 1, 0)^T$ на нормаль 5v_i .

Рассмотрим далее, от каких приводных координат зависит 5C_i . Поскольку ${}^5C_i = {}^5C_6 {}^6C_i$, где ${}^6C_i = {}^6C_D {}^D C_i$, матрица 6C_D постоянна (рис. 5), ${}^D C_i$ — задана, 5C_6 зависит только от q_6 , то 5C_i также зависит только от q_6 . Поэтому соотношение (7) может быть записано как

$${}^5C_{i22}(q_6) = 0, \quad (8)$$

Это условие позволяет обеспечивать давление на поверхность с заданной силой F_n , управляя только моментом M_5 привода 5-й оси.

Выбор инструмента и методика определения параметров, определяющих положение режущей кромки на режущей поверхности

Выбор инструмента для воспроизведения требуемой поверхности детали после обработки определяется конфигурацией режущей поверхности и возможностью достижения режущей кромки проблемных участков обрабатываемой поверхности. Применительно к обработке пера лопаток ГТД (рис. 6) режущая

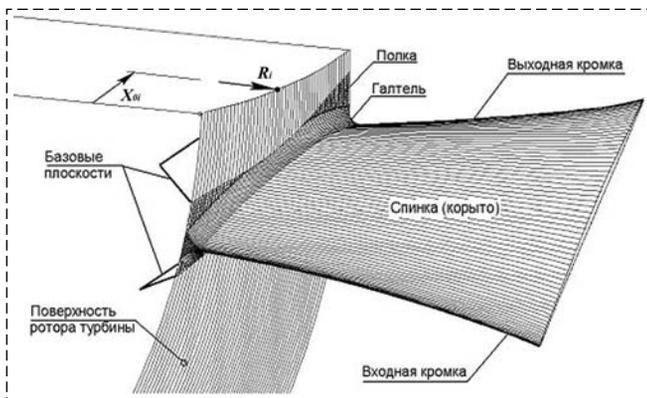


Рис. 6. Обрабатываемая поверхность пера лопаток ГТД
Fig. 6. Treated blade surface of GTE blades

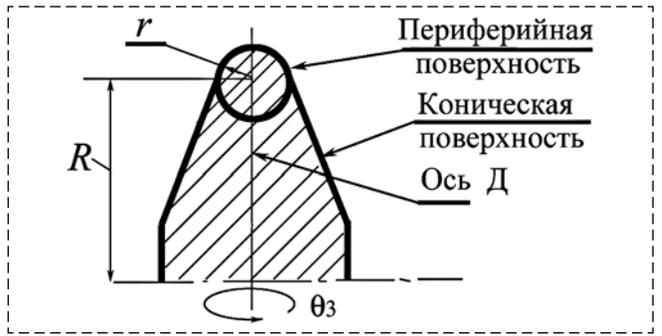


Рис. 7. Радиальное сечение шлифовального круга, имеющего торовую поверхность
Fig. 7. Radial section of a grinding wheel having a torus surface

поверхность должна обеспечивать обработку спинки (корыта), кромок, прикомлевого участка и специальных полок.

В качестве примера инструмента для обработки пера лопаток ГТД рассмотрим шлифовальный круг, имеющий режущую поверхность, представляющую торовую поверхность (см. рис. 1, б). На рис. 7 приведено радиальное сечение режущей поверхности, которая кроме торовой поверхности включает коническую поверхность.

На примере шлифовального круга рассмотрим методику определения углов θ , определяющих положение режущей кромки при обработке пера лопаток (см. рис. 6). Особенностью торовой поверхности является то, что в каждой точке данной поверхности в нормальном сечении можно получить различную кривизну, изменяемую в пределах

$$\frac{\cos(\theta_2)}{R + r \cos(\theta_2)} \leq k_i \leq \frac{1}{r}. \quad (9)$$

В этом случае, изменяя угол θ_3 , определяющий поворот режущей кромки вокруг нормали v_i , можно воспроизводить вогнутую поверхность корыта с требуемой кривизной для каждой i -й точки поверхности. При обработке корыта для каждой точки обрабатываемой поверхности значение угла θ_3 следует в первом приближении выбирать таким, чтобы в каждой точке траектории относительного движения детали кривизна поверхности в нормальном сечении, перпендикулярном траектории движения, имела минимальное значение из всех значений кривизны в сечениях, проходящих через нормаль:

$$\theta_3 = \pm \arctg \sqrt{\frac{(K_{1И} - K_{1Д})(K_{2И} - K_{2Д})}{(K_{1Д} - K_{2И})(K_{1И} - K_{2Д})}} + \pi N, \quad (10)$$

где $K_{1И}, K_{2И}$ — главные значения кривизны поверхности инструмента; $K_{1Д}, K_{2Д}$ — главные значения кривизны поверхности детали. Индексы 1 и 2 определяют: 1 — минимум и 2 — максимум кривизны в нормальном сечении при повороте плоскости сечения вокруг нормали. Формула (10) получена из формулы Эйлера [9] для соприкасающихся поверхностей инструмента и детали, а начало отсчета угла θ_3 связано с линиями кривизны и применяется для выбора начального приближения значения этого угла. Уточнение значений θ_2 и θ_3 проводится численными методами [10], учитывающими геометрию не только локальных участков, а всех контактирующих поверхностей.

Необходимое условие локального непересечения поверхностей:

$$\begin{aligned} K_{И,\min} &\geq K_{Д,\min}; \\ K_{И,\max} &\geq K_{Д,\max}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $K_{И,\min}, K_{Д,\min}$ — минимальные главные значения кривизны инструмента и детали, соответственно, а $K_{И,\max}, K_{Д,\max}$ — максимальные главные значения кривизны инструмента и детали. Если же требуется обеспечить наиболее плотный локальный контакт инструмента и детали, то необходимо дополнительное условие

$$K_{Д,\max} \geq K_{И,\min}, \quad (12)$$

которое вместе с условием локального непересечения (11) обеспечит существование действительного решения (10). В зависимости от знака главных значений кривизны точки поверхности делятся на выпуклые, вогнутые и гиперболические (разные знаки K_1 и K_2). Поверхность пера лопатки (см. рис. 6) в основном состоит из гиперболических точек и может обрабатываться конической режущей поверхностью. Выпуклая или коническая поверхность полки невелика, и поэтому для нее требуется выполнение только условия (11), а для плоской поверхности полки возможен линейчатый контакт с конической режущей поверхностью. Для торовой режущей поверхности при обработке сопряжения возможно выполнение обоих условий (11), (12).

Как видно из соотношения (10), θ_3 влияет на разность кривизны в нормальном сечении, а для тора (9) и конуса θ_2 (перемещение по образующей) влияет на $K_{2И}$. Координата поворота вокруг оси инструмента θ_1 на кривизну режущей поверхности инструмента в точке контакта не влияет, также она не влияет на разность

кривизны в нормальном сечении. Поэтому θ_2 и θ_3 определяются из соотношения (10) и других условий контакта поверхностей, в то время как θ_1 определяется из дополнительного условия совместно с обобщенными координатами манипулятора. Данное условие обеспечивает максимальную ширину снимаемого слоя поверхности.

Угол θ_2 , определяющий поворот режущей кромки вокруг оси β , должен обеспечивать совпадение касательной, проведенной к траектории движения детали в i -й точке поверхности, и касательной к окружности радиуса r (рис. 7). Для исключения подреза необходимо, чтобы нормальная кривизна поверхности детали в каждой точке траектории была меньше $1/r$. При выполнении данного условия выбор угла θ_2 определяется отсутствием касания необрабатываемых частей детали с режущей поверхностью.

Обработку спинки пера лопатки целесообразно выполнять линейчатой режущей поверхностью инструмента (это коническая поверхность (рис. 7)). В данном случае для обеспечения максимальной ширины снимаемого слоя следует выбирать расстояние между траекториями движения детали относительно инструмента таким образом, чтобы расстояние между образующей конической поверхности и точками обрабатываемой поверхности, расположенными на линии, образованной пересечением нормальной плоскости, проходящей через образующую конической поверхности, не превышало допустимого отклонения требуемой поверхности и получаемой после обработки.

Обработка галтели (см. рис. 6) затруднена тем, что галтель должна обеспечивать плавный переход с поверхности спинки (корыта) в полку (см. рис. 6). В этом случае галтель имеет переменный радиус. Воспроизведение данного радиуса может быть обеспечено, если обработку осуществлять периферийной частью режущей поверхности (рис. 7). При этом переменный радиус галтели формируется поворотом инструмента вокруг оси Д.

Определение угла θ_1 совместно с приводными координатами робота при условии обеспечения перпендикулярности оси 5-го привода и нормали

Таким образом, выбор углов θ_2 и θ_3 определяется видом обрабатываемой поверхности и инструмента для каждой обрабатываемой поверхности индивидуально, а угол θ_1 вычисля-

датчика решает обратную задачу вычисления моментов, развиваемых приводами робота, по информации силомоментного датчика (СМД), устанавливаемого на захватном устройстве робота $\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix}^*$.

Вычислитель управляемого момента $M_5(t)$ определяет программное значение момента для каждой i -й точки поверхности, обеспечивая заданное усилие давления на поверхность F_n :

$$M_5(t) = F_n R. \quad (9)$$

Настройка переходного процесса по моменту осуществляется регулировкой коэффициента C .

Формирование управляющего воздействия на примере численного моделирования

Исследуемая траектория [7] состоит из 11 335 положений режущей кромки, обеспечивающих обход лопатки в следующей последовательности:

1. Продольные движения по входной кромке.
2. Поперечные движения по спинке.
3. Продольные движения по выходной кромке.
4. Поперечные движения по корыту.
5. Круговой обход прикомлевого участка.

Для траектории проводилось решение обратной задачи о положении при условии (8) — равенства нулю скалярного произведения ${}^0\mathbf{Y}_5^0 \mathbf{v}_i$, при этом определялся угол θ_1 при заданных массивах θ_2 и θ_3

Диапазон найденных значений θ_1 около 35° :

$$-19,4785^\circ < \theta_1 < 14,2551^\circ,$$

а максимальное его приращение для всей траектории составило $0,7249^\circ$, что обеспечивает необходимое условие плавности движения при обработке. По мере уменьшения Δz_i (приближения режущей кромки к прикомлевному участку), колебания θ_1 увеличиваются в связи с большими угловыми смещениями оси инструмента в системе координат детали при обработке этого участка ее поверхности. При этом обеспечена необходимая непрерывность траектории и, соответственно, управляющего воздействия по положению.

Таким образом, при выполнении робототехнической системой технологических операций, в которых требуется перемещать ис-

полнительный орган по заданной траектории с одновременным управлением усилием (давлением) в направлении, не совпадающим с направлением движения, можно обеспечить данное управляемое усилие введением дополнительных устройств.

Однако, для многокоординатного исполнительного органа робота можно выделить степени подвижности, создающие управляемое усилие. Оставшиеся степени подвижности должны обеспечивать перемещение и ориентацию исполнительного органа при движении по траектории. Если число обобщенных координат не достаточно для выполнения данного перемещения, то можно использовать дополнительные параметры, определяющие положение исполнительного органа.

Так как многие технологические операции можно выполнять в различных областях зоны обслуживания исполнительного органа робота, то в качестве дополнительных параметров следует использовать неуправляемые параметры, определяющие положение и ориентацию исполнительного органа в зоне обслуживания. Так, при выполнении операций обработки сложных поверхностей такими неуправляемыми параметрами могут быть параметры, определяющие положение режущей кромки на режущей поверхности и вычисляемые совместно с обобщенными координатами робота, так, как это показано в представленной работе.

Список литературы

1. Vukobratovic M., Stokic D. Control of Manipulation Robots: Theory and Application. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 366 p.
2. Егоров И. Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 192 с.
3. Афонин В. Л., Смоленцев А. Н. Позиционно-силовое управление в механизмах параллельной структуры // Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 5. С. 14—19.
4. Журавлев В. В. Системы позиционно-силового управления роботом для механотерапии: канд. дис. 20.09.2011. 125 с.
5. Афонин В. Л., Макушкин В. А. Интеллектуальные робототехнические системы: Курс лекций. Учеб. пособие. Интернет Университет информационных технологий. М., 2005. 208 с.
6. Krantz M., Andersson R. Robotized Polishing and Deburring with Force Feedback Control. Trollhattan: University West, Department of Engineering Science, 2010. 48 p.
7. Afonin V. L., Kondrat'ev I. M., Nazarov R. A. Automatic Tool to Part Motion Path Generation for Turbine-Blade Machining // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44, N. 7. P. 593—602.
8. Фу К., Гонсалес Р. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
9. Феников С. П. Теория поверхностей. М.: ОНТИ Государственное технико-теоретическое издательство, 1934. 208 с.

10. Смоленцев А. Н. Формообразование поверхностей точной части турбинной лопатки абразивным инструментом // Справочник. Инженерный журнал. 2002. № 4. С. 24–28.

11. Афонин В. Л., Смоленцев А. Н., Гаврилина Л. В. Отчет о НИР. "Разработка технологии автоматизированного

выполнения финишных операций обработки сложно профильных поверхностей деталей ГТД с использованием промышленных роботов (Интеллектуальные технологические комплексы для финишной обработки пера лопаток ГТД)". № ГР АААА-А18-118011890132-7. 2018. 91 с.

Position-Force Control for a Six Coordinate Industrial Robot when Performing Complicated Surface Treatment

V. L. Afonin, afoninwl@rambler.ru, L. V. Gavrulina, griboedova04@mail.ru, A. N. Smolentsev, alexeisml@yandex.ru

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences Moscow, 101990, Russian Federation

Corresponding author: Afonin Vyatcheslav L., D. Sc., Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 101990, Russian Federation, e-mail: afoninwl@rambler.ru

Accepted on August 15, 2018

Abstract

When performing certain technological operations, multi-coordinate industrial robots require simultaneous control of the movement of the executive body and the developed effort. When performing assembly operations (for example, a shaft with a bush), it is necessary to perform a free movement of the shaft along the bore of the bushing and to ensure minimum pressure on the bore walls. When performing operations to handle complex surfaces of parts, it is simultaneously required to move the tool over the surface at a specified speed and to perform a metered pressure on the surface. Since it is impossible to control the force and motion simultaneously at the same coordinate, it is necessary either to switch from one control method to another, or to control various actuators and different controllable coordinates of the actuator. In multi-coordinate robots, this task is complicated by the fact that to control the movement of one of the Cartesian coordinates of the executive body, and by another force, it is simultaneously necessary to control the interrelated generalized coordinates of the robot's mechanism. In the work presented, the solution of the problem of control of a six-coordinate industrial robot is described, in which the separation of the degrees of mobility into power control and positional control of trajectory motion is carried out. In order to accomplish the task, additional variable parameters are introduced for the treatment of complex surfaces, which determine the position of the cutting edge on the cutting surface, which makes it possible to expand the service area of the robot during selection, for example, one of the coordinates for controlling the pressure force. This task is considered using the example of a six-coordinate industrial robot when performing a complex surface treatment operation, when it is required to program the tool at a specified speed along a path on the surface and at the same time carry out the controlled pressure of the tool on the surface.

Keywords: position-force control, gas turbine engine (GTE), industrial robot, GTE turbine blade

For citation:

Afonin V. L., Gavrulina L. V., Smolentsev A. N. Position-Force Control for a Six Coordinate Industrial Robot when Performing Complicated Surface Treatment, *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 34–43.

DOI: 10.17587/mau.20.34-43

References

1. Vukobratovic M., Stokic D. Control of Manipulation Robots: Theory and Application, Springer-Verlag, Berlin, 1982, 366 p.

2. Yegorov I. N. *Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami* (Position-force control of robotic and mechatronic devices), Publishing house of Vladim. Gos. Un-t, 2010, 192 p. (in Russian).

3. Afonin V. L., Smolentsev A. N. *Pozitsionno-silovoye upravleniye v mekhanizmaxh parallel'noy struktury* (Position-force control in the mechanisms of parallel structure), *Spravochnik. Inzhenernyy Zhurnal*, 2003, no. 5, p. 14–19 (in Russian).

4. Zhuravlev V. V. *Sistemy pozitsionno – silovogo upravleniya robotom dlya mekhanoterapii* (Systems of position-force robot control for mechanotherapy), Candidate's dissertation is 20.09.2011, 125 p. (in Russian).

5. Afonin V. L., Makushkin V. A. *Intellektual'nyye robototekhnicheskiye sistemy: Kurs lektsiy. Uchebnoye posobiye. Internet Universitet informatsionnykh tekhnologiy* (Intellectual Robotic Systems:

A Course of Lectures. Tutorial. Internet University of Information Technologies), Moscow, 2005, 208 p. (in Russian).

6. Krantz M., Andersson R. Robotized Polishing and Deburring with Force Feedback Control, University West, Department of Engineering Science, Trollhattan, SWEDEN, 2010, 48 p.

7. Afonin V. L., Kondrat'ev I. M., Nazarov R. A. Automatic Tool to Part Motion Path Generation for Turbine-Blade Machining, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, no. 7, pp. 593–602.

8. Fu K., Gonsales R. *Robototekhnika* (Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence), Moscow, Mir, 1989, 624 p. (in Russian).

9. Finikov S. P. *Teoriya poverkhnostey* (Theory of surfaces), Moscow, ONTI State Technical and Theoretical Publishing House, 1934, 208 p. (in Russian).

10. Smolentsev A. N. *Formoobrazovaniye poverkhnostey prochnoy chasti turbinnoy lopatki abrazivnym instrumentom* (Forming the surfaces of the flowing part of the turbine blade with an abrasive tool), *Inzhenernyy Zhurnal*, 2002, no.4, pp. 24–28 (in Russian).

11. Afonin V. L., Smolentsev A. N., Gavrulina L. V. *Otchet o NIR. "Razrabotka tekhnologii avtomatizirovannogo vypolneniya finishnykh operatsiy obrabotki slozhno profil'nykh poverkhnostey detaley GTD s ispol'zovaniyem promyshlennykh robotov (Intellektual'nyye tekhnologicheskiye komplekсы dlya finishnoy obrabotki pera lopatok GTD)"* (Report on research. "Development of the technology for automated completion of finishing operations of complex profile surfaces of GTE parts using industrial robots (Intelligent technological complexes for finishing the blade of GTE blades)") № GR АААА-А18-118011890132-7, 2018, 91 p. (in Russian).