

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ОБОРУДОВАНИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

*В.А. Смирнов*

## PRODUCTIVITY IMPROVEMENT OF MATERIAL PROCESSING IN THE EQUIPMENT WITH PARALLEL KINEMATICS

*V.A. Smirnov*

Показано, что при выполнении на оборудовании с параллельными приводами некоторых технологических операций появляется возможность оптимизации управления с целью уменьшения времени выполнения этих операций.

*Ключевые слова:* оптимальное управление, оборудование с параллельной кинематикой, снижение времени выполнения технологических операций.

It is shown that during performing on equipment with shunt package some technological operation the possibility of optimization of control for reduction of operating time appears.

*Keywords:* optimal control, equipment with parallel kinematics, decrease of operating time.

Использование при построении технологического оборудования механизмов с параллельными кинематическими цепями (МПКЦ) позволяет существенно снизить металлоемкость оборудования при обеспечении необходимой жесткости. Оборудование, построенное на основе МПКЦ (оборудование с параллельной кинематикой - ОПК), способно обеспечивать высокую точность и скорость обработки. В ряде случаев особенности МПКЦ способны придать ОПК дополнительные качества, повышающие эффективность выполнения на этом оборудовании технологических операций [1].

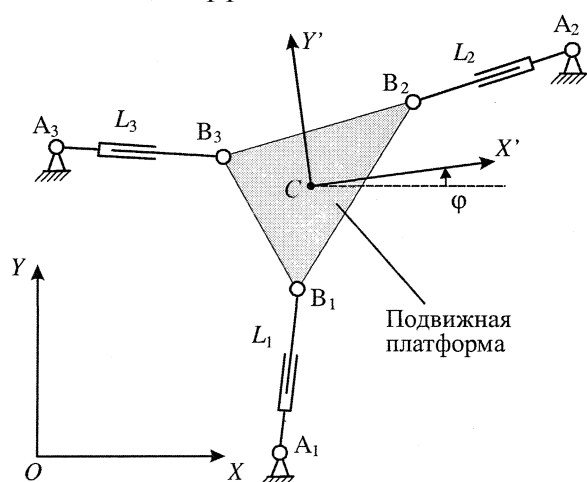


Рис. 1. Плоский МПКЦ с 3 степенями свободы

Рассмотрим плоский МПКЦ, показанный на рис. 1. Механизм имеет 3 степени свободы, его входными координатами будут являться длины  $L_j = \sqrt{(x_{A_j} - x_{B_j})^2 + (y_{A_j} - y_{B_j})^2}$  его штанг, где координаты шарниров  $A_j, B_j$  задаются в произвольной системе координат (СК). Примем, для определенности, что координаты шарниров задаются в неподвижной СК  $OXY$ . Выходными для рассматриваемого МПКЦ будут являться декартовы (линейные) координаты  $(x_c, y_c)$  некоторой точки  $C$  подвижной платформы в неподвижной СК  $OXY$ , а также угол  $\varphi$ , характеризующий разворот платформы вокруг точки  $C$ . На рис. 1 СК  $O'X'Y'$  связана с подвижной платформой.

В технологическом оборудовании, построенном на основе такого МПКЦ, рабочий орган может перемещаться по трем координатам: двум линейным и одной угловой. Однако при выполнении некоторых технологических операций реализация управляемого движения по трем координатам может не требоваться.

Пусть на подвижной платформе механизма установлен шпиндельный узел с вращающимся инструментом, например, фрезой (рис. 2). Примем, что ось  $CZ'$ , дополняющая связанную с

платформой СК до правой, является продольной осью вращения инструмента, установленного на подвижной платформе. Очевидно, что при реализации фрезерных операций требуется перемещение шпинделя по двум линейным координатам; изменение выходной координаты  $\varphi$  при неизменных координатах  $x_C$  и  $y_C$  не нарушит выполнение оборудованием своих функций. Состояния механизма, показанные на рис. 3, при выполнении фрезерных операций равнозначны, так как координаты продольной оси инструмента определяются только величинами  $x_C$ ,  $y_C$  и в обоих случаях равны.

Следовательно, угловая координата  $\varphi$  в данном случае является избыточной: при выполнении операции фрезерования рассматриваемый МПКЦ может быть заменен механизмом, имеющим две степени свободы. Однако наличие избыточной координаты может быть использовано для придания оборудованию дополнительных качеств, направленных на повышение эффективности выполнения технологических операций.

Траектория движения инструмента может быть определена посредством последовательности точек, каждая из которых характеризуется своим набором выходных координат. Рассмотрим переход МПКЦ из некоторой исходной точки, имеющей набор выходных координат  $x_C^I$ ,  $y_C^I$ ,  $\varphi^I$ , в показанные на рис. 4 состояния I и II. Значения выходных координат для этих состояний можно определить как  $x_{C^*}^I = x_{C^*}^II$ ,  $y_{C^*}^I = y_{C^*}^II$ ,  $\varphi^I = \varphi^II \neq \varphi^II$ , т. е. состояния I и II отличаются только значениями угловой выходной координаты  $\varphi$ , поэтому для выполнения технологической операции фрезерования равнозначны и соответствуют одной точке траектории. Однако, переход из исходной точки в состояние II потребует меньшего, по сравнению с переходом в состояние I изменения  $\Delta L_j$  длин  $L_j$  каждой из штанг. Следовательно, при прочих равных условиях, переход в состояние II может быть выполнен за меньшее время, т. е. за счет рационального изменения выходной координаты  $\varphi$  может быть уменьшено время перехода от одной точки траектории к другой.

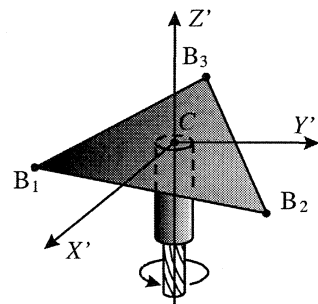


Рис. 2. Вращающийся инструмент, установленный на подвижной платформе

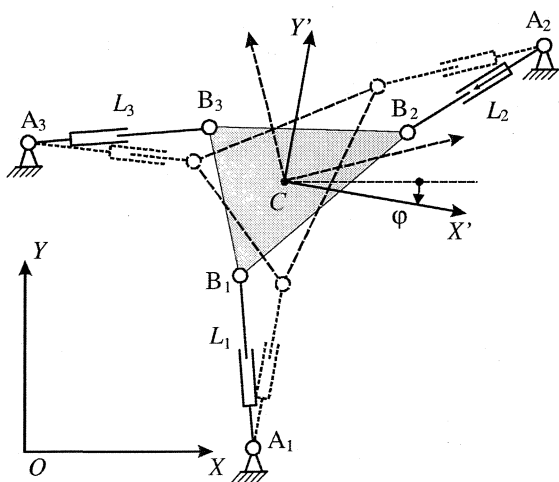


Рис. 3. Примеры различных конфигураций МПКЦ, обеспечивающих выполнение одинаковых функций

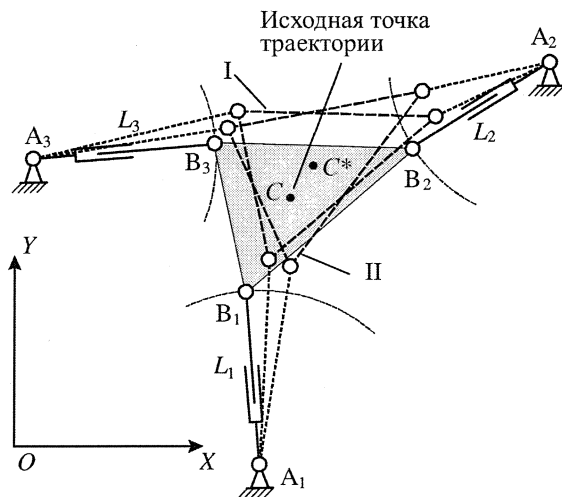


Рис. 4. Переход МПКЦ в равнозначные при выполнении фрезерных операций состояния

Управление вида

$$\max(\Delta L_j(\varphi_k)) \rightarrow \min,$$

(1)

при котором за счет изменения выходной угловой координаты  $\varphi$  минимизируется максимальное из изменений длин штанг, обеспечивающих переход от  $k$ -й точки траектории к следующей, называем оптимальным по приращению.

Так как расчет изменения длин штанг механизма производится при решении обратной задачи кинематики (нахождение входных координат по известным выходным) [2], то для реализации

оптимального по приращению управления (1) достаточно иметь информацию о требуемой траектории движения инструмента и учитывать кинематические ограничения МПКЦ на величину выходной координаты  $\varphi$ .

Для оценки повышения эффективности выполнения технологических операций за счет оптимального управления ОПК проведено численное моделирование применительно к следующей операции. На платформе плоского МПКЦ с тремя степенями свободы установлен шпиндельный узел, в котором закреплена цилиндрическая фреза радиусом  $R_\phi$ ; за счет движения центра платформы по окружности радиусом  $R$  в заготовке формируется отверстие радиусом  $R_{отв} = R + R_\phi$  с центром в точке  $O$  (рис. 5).

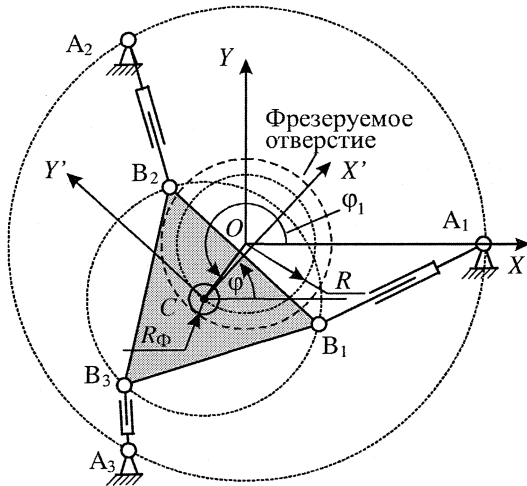


Рис. 5. Формирование отверстия заданного радиуса

управления (1) применительно к рассматриваемой технологической операции. При моделировании принято, что шарниры основания и платформы равномерно (с шагом в  $120^\circ$ ) размещены на окружностях радиусами 200 и 100 мм соответственно (см. рис. 5),  $R = 40$  мм. Моделирование проводилось для точек траектории, определяемых через изменение угла  $\varphi_i$ . Принято, что  $\Delta\varphi_1 = 1^\circ$ .

На рис. 7 представлены фигурирующие в критерии (1) максимальные из приращений  $\Delta L_j$  длин штанг для управления, при котором выходная угловая координата остается постоянной, и для случая реализации оптимального по приращению управления. Из рис. 7 видно, что для каждой точки траектории за счет изменения выходной координаты  $\varphi$  можно обеспечить уменьшение потребного изменения длин штанг.

Формообразующее движение может быть описано изменением угла  $\varphi_i$ , определяющего значения выходных линейных координат механизма при движении центра фрезы по окружности радиусом  $R$ . Для сравнения при моделировании помимо оптимального рассматривалось управление, при котором выходная угловая координата  $\varphi$  постоянна и равна  $15^\circ$ .

На рис. 6 показан закон изменения выходной угловой координаты  $\varphi$ , полученный в ходе моделирования оптимального по приращению

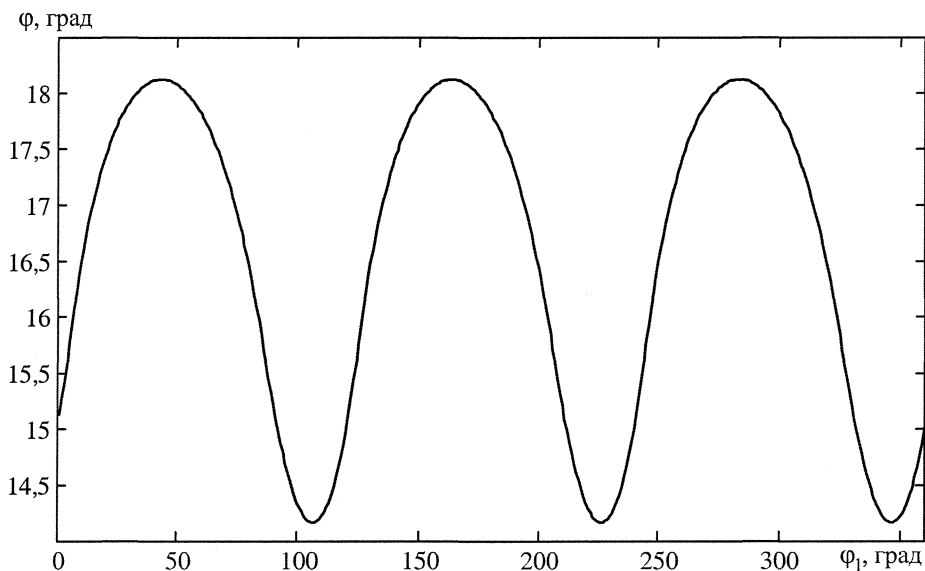


Рис. 6. Закон изменения выходной угловой координаты  $\varphi$ , обеспечивающий оптимальное по приращению управление

Численно возможность уменьшения необходимых для формирования траектории изменений длин штанг иллюстрируют интегральные параметры

$$\Delta L_{\Sigma}^{\text{const}} = \sum_k \max(|\Delta L_{jk}^{\text{const}}|), \quad \Delta L_{\Sigma}^{\text{опт}} = \sum_k \max(|\Delta L_{jk}^{\text{опт}}|), \quad j=1...3, \quad (2)$$

где  $\Delta L_{jk}^{\text{const}}$  и  $\Delta L_{jk}^{\text{опт}}$  – изменения длины  $j$ -й штанги при переходе от  $k$ -й точки траектории к следующей для случаев управления при  $\varphi = \text{const}$  и оптимального по приращению соответственно. Суммирование ведется по всем точкам траектории. При моделировании получено, что  $\Delta L_{\Sigma}^{\text{const}} = 228$  мм и  $\Delta L_{\Sigma}^{\text{опт}} = 207$  мм, т. е. при формировании одной и той же траектории движения инструмента за счет реализации оптимального управления можно обеспечить уменьшение суммарного (по всей траектории) изменения длин штанг. Если скорость изменения длин штанг имеет ограничение по максимуму и максимальное на переходе от одной точки траектории к другой изменение длины штанги обрабатывается с максимальной скоростью, то за счет оптимального управления будет обеспечено снижение (в рассмотренном примере почти на 10 %) машинного времени, необходимого для выполнения технологической операции.

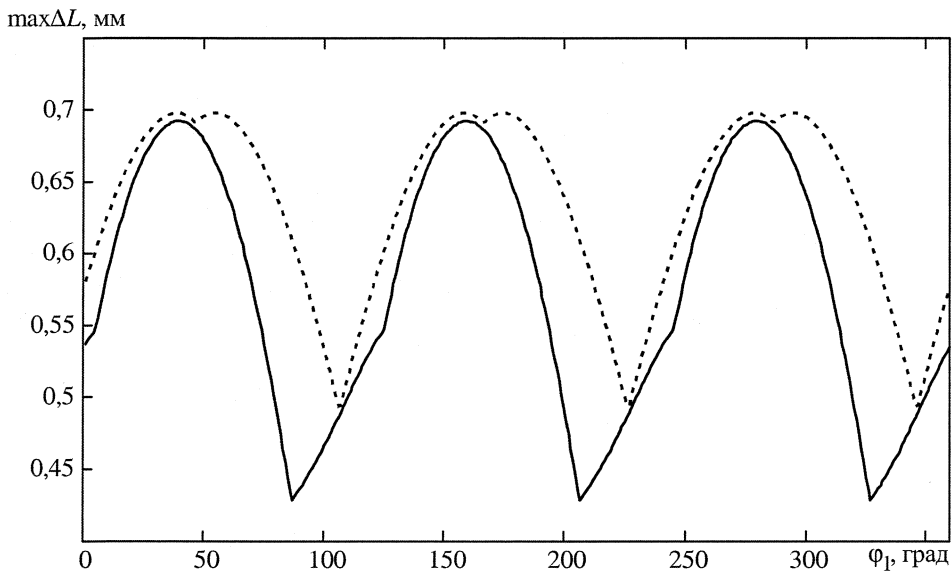


Рис. 7. Максимальные на каждом шаге траектории изменения длин штанг при формировании движения инструмента по окружности: — — —  $\varphi = \text{const}$ , — —  $\varphi$  изменяется с целью выполнения критерия оптимальности (1)

Таким образом, результаты моделирования подтвердили возможность уменьшения времени выполнения технологических операций за счет оптимального управления ОПК, построенным на основе рассмотренного плоского МПКЦ.

Избыточность выходных координат не является особенностью конкретного МПКЦ, она определяется реализуемой технологической операцией. Поэтому избыточность выходных координат характерна не только для рассмотренного плоского МПКЦ, она может проявляться и в пространственных МПКЦ, используемых, например, при построении станков-гексаподов [3].

В станках-гексаподах инструмент может совершать движение по шести координатам: трем линейным и трем угловым [4], что позволяет реализовывать на таком оборудовании многокоординатную обработку. При многокоординатной обработке материалов часто используются фрезы, имеющие режущую поверхность в виде части сферы. На рис. 8 показано формирование с помощью такой фрезы одной и той же линии на поверхности детали.

Сферичность режущей кромки позволяет изменять в некоторых пределах угловые координаты, определяющие ориентацию инструмента. Пределы изменения углов наклона фрезы определяются кинематическими возможностями оборудования, а также особенностями детали (рис. 9). Следовательно, применительно к станкам-гексаподам при выполнении фрезерования в качестве избыточных могут рассматриваться от одной до всех трех угловых выходных координат.

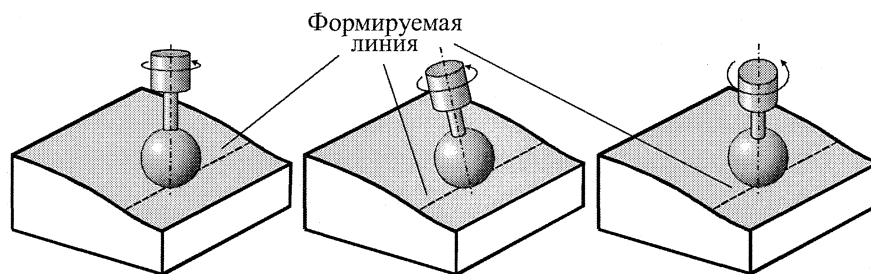


Рис. 8. Формирование одной и той же линии при различных ориентациях сферического инструмента

Для пространственного МПКЦ гексаподной схемы было выполнено моделирование движения закрепленного на подвижной платформе инструмента по окружности, аналогичной показанной на рис. 5. При моделировании рассматривалось три варианта управления:

- управление, при котором выходные угловые координаты оставались постоянными;
- оптимальное по приращению управление, для которого в качестве избыточной выступает только выходная угловая координата, определяющая разворот подвижной платформы относительно продольной оси инструмента;

- оптимальное по приращению управление, для которого в качестве избыточных выступают все три выходные угловые координаты.

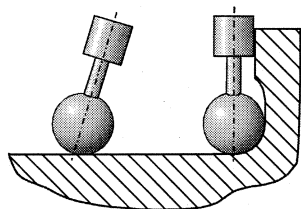


Рис. 9. Ограничение угла наклона сферического инструмента, вызванное особенностью детали

Расчет для этих вариантов интегральных параметров (2) показал, что по сравнению с первым вариантом управление, использующее только одну избыточную координату, обеспечивает повышение производительности на 4...6 %, использование при оптимальном управлении трех избыточных координат позволят повысить производительность на 20...25 %.

Таким образом, результаты моделирования показали возможность существенного *уменьшения* времени выполнения технологических операций за счет оптимального управления для ОПК, построенного на основе МПКЦ.

### Литература

1. Смирнов, В.А. Повышение энергоэффективности оборудования с параллельными приводами / В.А. Смирнов, Ю.Л. Сюськина // *Современные проблемы информатизации в анализе и синтезе программных и телекоммуникационных систем: сб. тр. по итогам XV междунар. открытой науч. конф.* - Воронеж.: Научная книга, 2010. - С 383-387.
2. Манипуляционные системы роботов / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес и др.; под общ. ред. А.И. Корендясева. - М.: Машиностроение, 1989. - 472 с.
3. Подзоров, П.В. Механизмы параллельной кинематики в станкостроении / П.В. Подзоров // *Инженерный журнал. Приложение.* - 2005. - № 8. - С. 2-24.
4. Смирнов, В.А. Научные основы и алгоритмы управления оборудованием с параллельными приводами / В.А. Смирнов. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. - 164 с.

Поступила в редакцию 10 февраля 2010 г.

Смирнов Владимир Алексеевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация механосборочного производства» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - современные методы управления технологическим оборудованием.

Vladimir A. Smirnov. The candidate of engineering science, senior lecturer of «Mechano-Assembly Automation» department of the South Ural State University. Professional interests: modern methods of control of manufacturing equipments.