

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ЗАВИСИМОСТИ КОНТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

© 2007 А.С. Заруднев, Ю.В. Илюхин

Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”

Предложен закон движения рабочего органа лазерных комплексов, обладающих упругими механическими компонентами, который повышает производительность при обеспечении требуемой контурной точности движения. Параметры закона движения оптимизируются на основании выявленной зависимости контурной ошибки в узлах желаемой траектории от скорости движения, геометрических характеристик сегментов траектории и динамических свойств исполнительных приводов и механических компонентов.

### Постановка задачи

В настоящее время на промышленных предприятиях малого и среднего бизнеса получили распространение компактные и относительно недорогие технологические комплексы лазерной резки. Их особенность состоит в том, что они реализуют движение рабочего органа (лазерной головки) по двум или трём координатам, содержат устройства управления на базе персональных компьютеров, комплектные исполнительные следящие приводы с бесконтактными двигателями постоянного тока и координатные столы, как правило, оснащённые механическими передачами на базе зубчатых ремней. Такие комплексы удобны в эксплуатации, поскольку обладают открытой архитектурой и развиваемым программным обеспечением, однако имеют среднюю степень точности, обусловленной, прежде всего, упругостью механических передач.

Актуальной задачей является повышение производительности рассматриваемого класса лазерных комплексов при обеспечении требуемой гарантированной точности вырезаемых деталей. В качестве критерия производительности рассматривается время  $T$  выполнения программы движения рабочего органа лазерного комплекса, причём должно выполняться условие

$$T \rightarrow T_{\text{МИН}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{МИН}}$  – минимальное достижимое время лазерной обработки. Приведённое условие

рассматривается при соблюдении технологических ограничений, наложенных на скорость  $V$  и ускорение  $a$  движения рабочего органа по желаемой траектории

$$V \leq V_{\text{МАХ}}; a \leq a_{\text{МАХ}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{МАХ}}$ ,  $a_{\text{МАХ}}$  – максимальные допустимые значения контурной скорости и ускорения, соответственно, обусловленные мощностью лазера, необходимостью снижения перегрузок, действующих на оптику рабочего органа, и ограниченными возможностями исполнительных приводов. Очевидно, что для повышения производительности скорость и ускорение движения рабочего органа на каждом сегменте траектории должны быть как можно больше, однако рост этих величин сдерживается их влиянием на контурную ошибку лазерной обработки, которая представляет собой отклонение фактической траектории движения рабочего органа от желаемой траектории.

Для решения поставленной задачи повышения производительности целесообразно рассматривать лазерные комплексы как мехатронные системы [ 1 ] и повышать их быстродействие за счёт развития концепции построения системы в целом с позиции мехатроники, применения принципов мехатронного подхода [ 2 ], и, в первую очередь, путём совершенствования алгоритма компьютерного управления движением. Искомый алгоритм должен обеспечивать выбор наибольшей допустимой контурной скорости для каждого

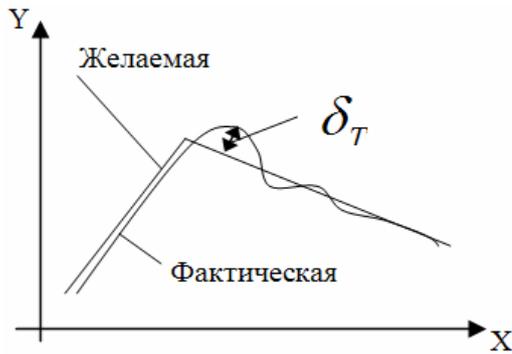


Рис. 1. Образование траекторной ошибки

сегмента траектории, возможность согласования скоростей при переходе на соседний сегмент траектории при максимальном допустимом ускорении и соблюдения требований к точности движений

$$\delta_T \leq \delta_{T.ДОП}, \quad (3)$$

где  $\delta_T$ ,  $\delta_{T.ДОП}$  – абсолютные значения фактической и допустимой контурной ошибки, соответственно. Контурной ошибкой является отклонение фактически реализованной траектории движения рабочего органа от желаемой траектории его движения. Процесс образования траекторной ошибки при движении рабочего органа в области узла траектории, где смыкаются два соседних сегмента, показан на рис. 1.

Важно подчеркнуть, что управление движением рабочего органа при ограничении контурной ошибки отличается от управления с ограничением координатных ошибок исполнительных систем [3]. В частности, при правильной настройке компонентов системы может быть достигнута высокая точность установившегося движения по желаемой траектории при координатных ошибках, в несколько раз превышающих  $\delta_{T.ДОП}$ . В то же время, некорректная настройка приводит к заметным отклонениям от желаемой траектории даже при незначительных координатных ошибках.

### Повышение точности движения рабочего органа

Решение задачи повышения производительности предусматривает, прежде всего, настройку следящих систем, обеспечивающую минимальное значение оценки  $\delta_{T.МАХ}$  максимального абсолютного значения контурной погрешности в установив-

шемся режиме обработки прямых и дугообразных участков траектории. Это даёт возможность повысить скорость движения и увеличить производительность комплекса. В [3] показано, что  $\delta_{T.МАХ}$  зависит от частот среза разомкнутых следящих приводов и частот собственных колебаний механических частей комплекса. Следует отметить, что для разных степеней подвижности координатного стола и при разных положениях рабочего органа имеют место различные значения частот собственных колебаний механических частей.

Для выполнения условия (3) предлагается рассматривать неравенство  $\delta_{T.МАХ} \leq \delta_{T.ДОП}$  и выбирать частоты среза  $\omega_{С.П}$  всех следящих приводов одинаковыми в соответствии с уравнением

$$\omega_{С.П} = \frac{\omega_{О.МИН} \omega_{О.МАХ}}{\sqrt{\omega_{О.МИН}^2 + \omega_{О.МАХ}^2}}, \quad (4)$$

где  $\omega_{О.МИН}$  и  $\omega_{О.МАХ}$  – минимальное и максимальное значения частот собственных колебаний механических подсистем рассматриваемого лазерного комплекса, соответственно.

Такой выбор даёт возможность увеличить скорость движения при сохранении требуемой точности. Но при движении по траекториям, содержащим большое количество узлов сопряжения отдельных сегментов, представленных в [3] данных о зависимости траекторной ошибки от параметров исполнительных систем в установившемся режиме движения оказывается недостаточно. Необходимы дополнительные сведения о траекторной ошибке, возникающей в динамике при проходе рабочего органа через узлы траектории. Для обеспечения необходимой точности движения традиционные алгоритмы управления движением рабочего органа, реализованные в большинстве промышленных систем управления лазерных комплексов, предусматривают снижение контурной скорости движения в узловых точках траектории до нуля. При этом, как показывает опыт эксплуатации подобных систем, общее время выполнения технологической операции лазерной резки может оказаться весьма значительным именно из-за описанного снижения контурной скорости.

**Зависимость контурной погрешности от параметров движения, характеристик желаемой траектории и динамических свойств исполнительных систем**

Для дальнейшего повышения производительности предлагается формировать закон управления движением с учётом выявленной зависимости допустимой контурной скорости движения рабочего органа в узлах траектории от допустимой контурной погрешности, геометрических особенностей желаемой траектории и динамических свойств исполнительных приводов и механических частей технологического комплекса. Искомая зависимость определена в результате проведённых с помощью ЭВМ вычислительных экспериментов с математической моделью движения рабочего органа лазерной системы, ориентированной на компьютерное исследование производительности и контурной точности.

Математическая модель содержит описание формирователя задающих воздействий на следящие приводы, математическое описание комплекса исполнительных следящих систем и блок вычисления траекторной ошибки. На основании данных о запрограммированной траектории движения рабочего органа формирователь решает обратную задачу кинематики и создаёт задающие воздействия, представляющие собой желаемые перемещения по координатным осям системы. При этом реализуется трапецеидальный характер изменения желаемой контурной скорости и её непрерывность в узлах, объединяющих сопряжённые сегменты. Принципиальной особенностью является то, что желаемая контурная скорость в узле может быть отлична от нуля. В качестве описания исполнительных частей комплекса использована линеаризованная редуцированная модель. Предполагается, что в результате большой динамической жёсткости замкнутых приводов моменты реакции механических частей слабо влияют на движение валов двигателей и влиянием этих реакций можно пренебречь. Поэтому использованная при вычислительных экспериментах модель [ 4 ] характеризуется передаточными функциями

$$W_i(s) = \frac{1}{T_i s + 1} \cdot \frac{1}{\tau_i^2 s^2 + 2\xi_i \tau_i s + 1}, \quad (5)$$

где  $i$  – номер канала управления системы и соответствующего ему следящего привода, причём  $i = 1, \dots, N$ ;  $N$  – количество приводов в системе;  $T_i$  – постоянная времени редуцированной модели  $i$ -ого замкнутого следящего привода;  $\tau_i$  и  $\xi_i$  – постоянная времени и коэффициент относительного демпфирования  $i$ -ой механической подсистемы, соответственно. Отметим, что при моделировании постоянную времени  $\tau_i$  можно считать равной величине, обратной частоте собственных колебаний  $\omega_{O_i}$   $i$ -ой механической подсистемы, Постоянную времени  $T_i$  с достаточной для практики точностью можно оценить по формуле  $T_i = \omega_{C.П}^{-1}$ , если сформировать следящий привод как систему контуров подчинённого регулирования и выполнить настройку контуров регулирования тока и скорости в соответствии с рекомендациями [ 3 ]. Исходя из принципа минимизации сложности создаваемой системы управления движением, целесообразно обеспечивать соотношение частот среза разомкнутого привода, разомкнутой подсистемы регулирования скорости и разомкнутых подсистем регулирования токов 1:3:12.

Блок вычисления траекторной ошибки определяет её с учётом вида и взаимной ориентации сегментов траектории. Модель реализована в виде компьютерной программы, решающей соответствующую систему дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты.

В результате исследования установлено, что доминирующими факторами, влияющими на точность движения в узлах траектории, являются контурная скорость  $V$ , угол  $\alpha$  сопряжения сегментов траектории и динамические свойства исполнительных систем, характеризуемые частотой среза  $\omega_c$  разомкнутых следящих приводов, частотами собственных колебаний  $\omega_{O_1}, \dots, \omega_{O_N}$  и коэффициентами относительного демпфирования  $\xi_1, \dots, \xi_N$  механических подсистем, обладающих упругостью. Оказалось, что траекторная ошибка пропорциональна контурной скорости в узле траектории. Поэтому целесообразно ввести в рассмотрение относительную траекторную ошибку  $\delta_T = \delta_T V^{-1}$ .

Связь наибольшей относительной контурной ошибки в окрестности узлов траектории от динамических свойств исполнительных систем носит сложный характер.

Установлено, что максимальное значение относительной ошибки пропорционально абсолютному значению синуса угла  $\alpha$  между сопряжёнными сегментами при  $0 \leq \alpha \leq 0,5\pi$ . При  $\pi > \alpha > 0,5\pi$  контурная ошибка незначительно отличается от её значения при  $\alpha = 0,5\pi$ . На основании всей совокупности полученных результатов моделирования определена эмпирическая формула, предлагаемая для оценки относительной траекторной ошибки

$$\bar{\delta}_{T.MAX} = f_1(\alpha) \{ |\xi_{\omega.min} - 0,25| + 0,25 \} f_2(\omega_{O.MIN}, \omega_{O.MAX}), \quad (6)$$

где

$$f_1(\alpha) = \begin{cases} |\sin \alpha| & \text{при } 0 < \alpha < 0,5\pi, \\ 1 & \text{при } \pi > \alpha > 0,5\pi; \end{cases} \quad (7)$$

$\xi_{\omega.min}$  – значение коэффициента относительного демпфирования механической части с наименьшей частотой собственных колебаний;  $f_2(\omega_{O.MIN}, \omega_{O.MAX})$  – функция, характеризующая влияние динамических свойств исполнительных систем

$$f_2(\omega_{O.MIN}, \omega_{O.MAX}) = 1,5 \left| \frac{1}{\omega_{O.MIN}} - \frac{1}{\omega_{O.MAX}} \right| + \frac{1}{2\omega_{C.P.}}, \quad (8)$$

причём частота среза определяется в соответствии с правилом настройки следящих при-

водов по формуле (4).

Найденные эмпирические зависимости обладают приемлемой точностью. Об этом свидетельствуют графики (рис. 2) сравнения результатов вычислительного эксперимента (графики 1 и 3) и расчётов по предложенным формулам (6) – (8) (графики 2 и 4). Они получены для двухкоординатной системы управления движением при контурной скорости, равной 100 мм/с; переменных значениях частоты собственных колебаний  $\omega_{O1}$  одной из механических подсистем и фиксированных частотах собственных колебаний второй механической подсистемы  $\omega_{O2}$ , равных 105 с<sup>-1</sup> (графики 1 и 2) и 55 с<sup>-1</sup> (графики 3 и 4). Коэффициент относительного демпфирования для обеих механических подсистем равен 0,3, а угол между сегментами равен 90°.

Наибольшая погрешность определения максимальной относительной контурной ошибки по предложенным формулам (6) - (8) не превышает 26%. Поэтому они рекомендуются для построения алгоритмов выбора желаемой контурной скорости в узле траектории.

### Повышение производительности при обеспечении заданной точности

На основании полученной зависимости желаемой контурной скорости от параметров траектории и динамических свойств механических подсистем сформирован закон движения рабочего органа и разработан алгоритм оптимизации значений его параметров в со-

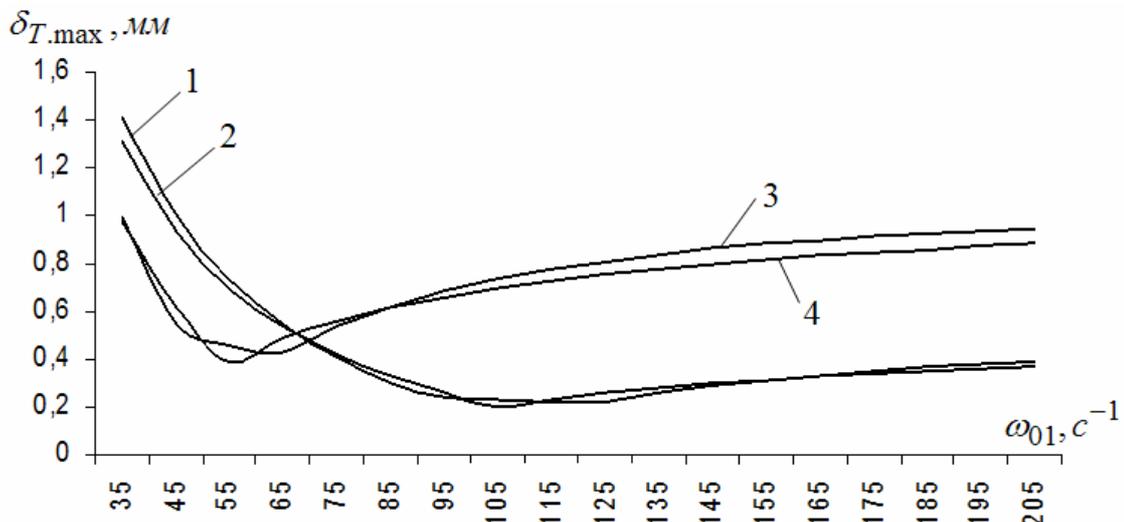


Рис. 2. Зависимость контурной ошибки от частот собственных колебаний механических частей

ответствии с требованием (1) и ограничениями (2) и (3). В соответствии с этим законом определяется желаемый путь  $L_k(t)$ , который должен пройти рабочий орган вдоль  $k$ -го сегмента желаемой траектории в функции от времени  $t$  движения по этому сегменту

$$L_k(t) = \begin{cases} V_{НАЧ}t + \frac{a_k t^2}{2} & \text{при } 0 < t \leq t_p \\ V_{НАЧ}t_p + \frac{a_k t_p^2}{2} + V_{НОМ}t & \text{при } t_p < t \leq t_p + t_{\Pi} \\ V_{НАЧ}t_p + \frac{a_k t_p^2}{2} + V_{НОМ}t_{\Pi} - \frac{a_k t^2}{2} & \text{при } t_p + t_{\Pi} < t \leq t_p + t_{\Pi} + t_T \end{cases}$$

где  $V_{НАЧ}$  и  $V_{НОМ}$  – контурная скорость в начале сегмента траектории и номинальная контурная скорость, соответственно;  $a_k$  – ускорение вдоль траектории;  $t_p$ ,  $t_T$ ,  $t_{\Pi}$  – времена разгона, торможения и движения с постоянной скоростью, соответственно, которые вычисляются в соответствии с уравнениями

$$t_p = \frac{V_{НОМ} - V_{НАЧ}}{a_k};$$

$$t_{\Pi} = \frac{L_{сег} - (V_{НАЧ}t_p + \frac{a_k t_p^2}{2}) - (V_{НОМ}t_T + \frac{a_k t_T^2}{2})}{V_{НОМ}};$$

$$t_T = \frac{V_{НОМ} - V_{КОН}}{a_k}.$$

Здесь  $V_{КОН}$  – контурная скорость в конце сегмента траектории. Путь  $L_k(t)$  является аргументом при определении желаемых координат рабочего органа, которые вычисляются с учётом типа и значений параметров каждого сегмента траектории.

Значения параметров, характеризующих характер изменения контурной скорости выбираются максимально возможными и, таким образом, при использовании предложенного закона управления повышение производительности достигается в результате максимально быстрого движения рабочего органа через узлы траектории при соблюдении требований к точности и отсутствию разрывов контурной скорости в узлах.

Разработан алгоритм определения оптимальных значений параметров предложенного закона управления движением рабочего органа, базирующийся на выявленных взаимосвязях точности исполнительных движений

с геометрическими характеристиками траекторий, контурной скоростью движения и динамическими свойствами исполнительных систем. В результате анализа исходных данных о желаемой траектории этот алгоритм обеспечивает определение предельной контурной скорости на сегментах в виде отрезков прямых или дуг окружностей, а также в узлах траектории и максимальной допустимой скорости, реализуемой в узлах при разгоне и торможении. В результате работы алгоритма определяются все параметры закона управления, обеспечивающие минимальное общее время выполнения программы лазерной резки.

### Реализация системы и экспериментальное исследование точности и производительности

Экспериментальная проверка результатов исследования выполнена с использованием разработанной авторами системы управления мехатронным лазерным комплексом, включающим в себя координатный стол с перемещениями 3400 x 2000 мм, цифровые исполнительные приводы на базе синхронных двигателей и преобразователей фирмы КЕВ и устройства управления на основе промышленного персонального компьютера с дополнительными периферийными устройствами. Комплекс имеет механические передачи в виде последовательно соединённых планетарных редукторов и зубчато-ремённых передач. Система оснащена специально разработанной программой управления, которая обеспечивает взаимодействие с пользователем, преобразует информацию о желаемой траектории и технологические данные в коды управления исполнительными приводами, лазером и вспомогательным оборудованием комплекса. При этом реализуется предложенный закон движения рабочего органа, минимизирующий затраты времени на обработку за счёт оптимизации профиля контурной скорости. Центральным в этой программе является блок оптимизации параметров закона движения. Программа написана на языке C++ в среде Borland C++ 3.11, работает под управлением операционной системы MS DOS 7.10 и обеспечивает жесткое реальное время с периодом квантования 3 мс.

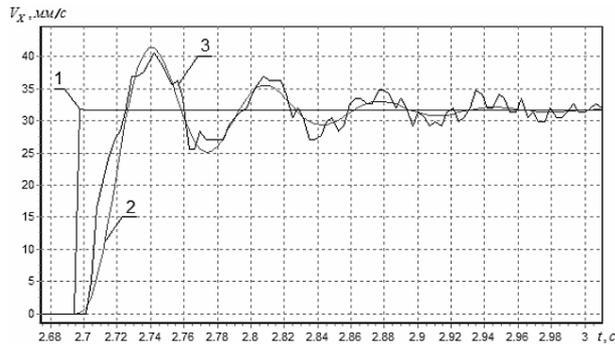


Рис. 3. Переходные процессы исполнительного привода

Сравнение результатов математического моделирования и натуральных экспериментов следящих приводов в составе лазерного комплекса показало качественное и количественное совпадение основных составляющих процессов, зафиксированных при моделировании и натуральных экспериментах (рис. 3).

На рис. 4 показаны: 1 – задающее воздействие, несущее информацию о желаемой скорости движения вала двигателя; 2 – процесс изменения скорости вала двигателя, полученный с помощью математической модели; 3 – процесс изменения скорости вала двигателя реального цифрового привода в составе лазерного комплекса, зафиксированный с помощью встроенного осциллографа. Среднеквадратичное отклонение скорости, полученной моделированием, от фактической скорости не превышает 10%

Используемые в программе моделирования значения частот среза приводов получе-

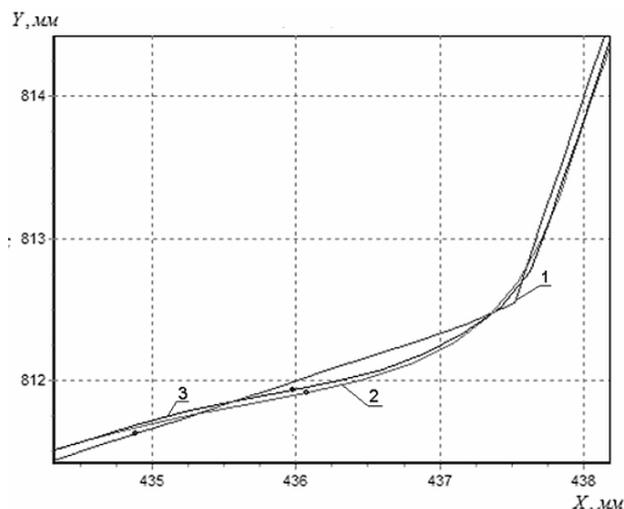


Рис. 4. Желаемая траектория движения рабочего органа (1), траектория, полученная путём моделирования (2) и фактическая траектория (3), зафиксированная в эксперименте.

ны непосредственно по настроечным параметрам программно реализованных регуляторов положения и коэффициентам передачи фотоимпульсных датчиков положения. Значения частот собственных колебаний  $\omega_{O1}, \dots, \omega_{ON}$  и коэффициентов относительного демпфирования  $\xi_1, \dots, \xi_N$  механических подсистем определены в результате идентификации параметров с использованием осциллограмм работы реальной системы.

Исследование контурной погрешности также свидетельствуют о сходстве результатов, полученных экспериментально и путём моделирования (рис. 4).

Экспериментальное исследование производительности системы, использующей предложенные закон движения и алгоритм оптимизации параметров, выполненное в компании “Лантан-Лазер”, свидетельствует о высокой эффективности предложенных алгоритмов управления. В частности, при выполнении управляющей программы лазерной резки с общей длиной реза более 32 м выигрыш производительности предлагаемой системы по сравнению с традиционной составил около 30%. При этом реальная результирующая контурная ошибка не превысила допустимый уровень, равный 100 мкм.

### Основные результаты исследования и рекомендации

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что предложенные на основании математического моделирования и натуральных экспериментов закон движения рабочего органа и алгоритм оптимизации его параметров обеспечивают повышение производительности лазерных комплексов, обладающих упругими механическими компонентами и предназначенных для резки деталей сложной формы. Предложенные закон движения и алгоритм могут быть также полезны для создания высокоэффективных систем управления ряда других технологических машин.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. М: Машиностроение, 2007.

2. *Илюхин Ю.В.* Синергетический (мехатронный) подход к проектированию систем управления технологических роботов // *Мехатроника*. 2000. № 2
3. *Илюхин Ю.В.* Реализация мехатронного подхода при построении систем компьютерного управления комплексов лазерной и плазменной резки // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2005. №10
4. *Заруднев А.С., Илюхин Ю.В.* Анализ точности движений лазерного комплекса // *Сборник докладов IX-ой научной конференции по математическому моделированию и информатике*. М.: МГТУ “Станкин” - ИММ РАН, 2006.

## **INCREASE OF PRODUCTIVITY OF MECHATRONIC COMPLEXES OF LASER PROCESSING ON THE BASIS OF DEPENDENCE OF THE PLANIMETRIC ERROR ON PARAMETERS OF MOVEMENT AND EXECUTIVE SYSTEMS**

© 2007 A.S. Zarudnev, Y.V. Ilukhin

Moscow State Technological University STANKIN

The law of movement of working body of the laser complexes possessing elastic mechanical components which raises productivity with respect of demanded planimetric accuracy is offered. Parameters of the law of movement are optimized on the basis of the revealed dependence of a planimetric error in the joints of a desirable trajectory from speed of movement, geometrical characteristics of a trajectory segments and dynamic properties of executive drives and mechanical components.