

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
СОСТАВНЫМИ ДВУХКООРДИНАТНЫМИ СКАНАТОРАМИ****В. П. Бессмельцев, Н. В. Голошевский***Институт автоматки и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск  
E-mail: nickolayg@iae.nsk.su*

Разработана система управления составными сканаторами, в которой лазерный луч перемещается внутри зоны записи, ограниченной полем фокусирующего объектива, с помощью дефлекторов. Дефлекторы установлены в сканирующей головке, которая, в свою очередь, может перемещаться по всему полю записи. На основе предложенной модели системы управления показано, что выбранный вариант реализации системы позволяет осуществлять прецизионную запись изображений на форматах, много больших поля записи фокусирующего объектива, с быстродействием, определяемым в основном дефлекторами сканирующей головки. Приводятся результаты моделирования поведения системы и экспериментальные результаты.

**Введение.** При лазерной обработке ряда материалов для оптимизации технологических режимов необходимо обеспечить высокую скорость перемещения сфокусированного лазерного луча с большой плотностью мощности. Требуемая скорость  $\sim 1$  м/с может быть достигнута за счет развертывающих систем на базе угловых дефлекторов [1]. Для получения высокой плотности мощности используются объективы с минимальным фокусным расстоянием и максимальной апертурой. При этом поле записи сканирующих систем на основе угловых дефлекторов для лазерных излучателей с  $\lambda = 1-10$  мкм ограничено размерами менее  $1 \text{ дм}^2$ , что объясняется сложностью проектирования и изготовления фокусирующих объективов с большим полем. Во многих задачах лазерной микрообработки размер поля должен быть, как минимум, на порядок больше.

Для решения таких задач возможно применение систем развертки лазерного луча с использованием составных сканаторов [2]. В подобных системах лазерный луч перемещается внутри зоны записи, ограниченной полем фокусирующего объектива, «быстрыми» угловыми дефлекторами, установленными в сканирующей головке, которая, в свою очередь, может перемещаться с помощью «относительно медленных» приводов по всему полю записи. Такая компоновка снижает требования, предъявляемые к фокусирующему объективу.

В данной работе рассматриваются задачи, возникающие при создании систем на основе составных сканаторов, а именно правильное разбиение изображения на малые зоны записи, «стыковка» элементов записи, попадающих в соседние зоны, учет геометрических искажений в оптической системе сканирующей головки и ее ориентации. Кроме того, для обеспечения максимального быстродействия записи при минимальных ошибках по всему полю необходимо организовать эффективное управление системой, состоящей из четырех приводов.

**Особенности управления составными сканаторами.** В большинстве устройств лазерной обработки материалов для перемещения сканирующей головки по большому полю записи используется электромеханический привод на основе моментных или шаговых двигателей. При перемещении сканирующей головки по произвольной траектории с высокой скоростью и точностью резко увеличиваются требования к мощности и качеству управления двигателями привода [3]. Используя принцип составного сканирования, можно минимизировать как статические, так и динамические ошибки позиционирования лазерного луча без значительного роста мощности привода.

Например, с целью упрощения конструкции лазерной системы микрообработки с микронной точностью для перемещения головки нами используются шаговые приводы (ШП) с относительно грубым (140 мкм) шагом перемещения. Общая точность и скорость обработки обеспечиваются применением для записи в ограниченном поле (50 × 50 мм) быстродействующих угловых зеркальных дефлекторов с субмикронным разрешением [4].

Для управления составным модулем сканирования, содержащим ШП и угловые гальванометрические сканеры, в режиме позонной записи предложена система с комбинированным управлением, структура которой приведена на рис. 1. Цифровые данные  $x, y$  перемещения лазерного луча в заданную позицию преобразуются блоками  $A_1$  и  $A_2$  в два потока:  $\bar{x}_b, \bar{y}_b$ , управляющий приводом  $A_4$  большого поля с дискретностью ШП, и  $\bar{x}_s, \bar{y}_s$ , корректирующий положение луча внутри зоны записи сканирующей головки так, чтобы  $x = \bar{x}_s + \bar{x}_b, y = \bar{y}_s + \bar{y}_b$ . Сигналы ошибки положения сканирующей головки  $\Delta x, \Delta y$ , вычисляемые как разность реального и заданного положений по каждой из координат:  $\Delta x_b = \bar{x}_b - x_b, \Delta y_b = \bar{y}_b - y_b$ , после обработки корректирующим блоком  $A_3$  суммируются с  $\bar{x}_s, \bar{y}_s$ . Результат сложения преобразуется блоком  $A_5$  в положение лазерного луча (угловое положение зеркал сканеров) в малом поле записи  $x_s, y_s$ . Определим результирующее положение

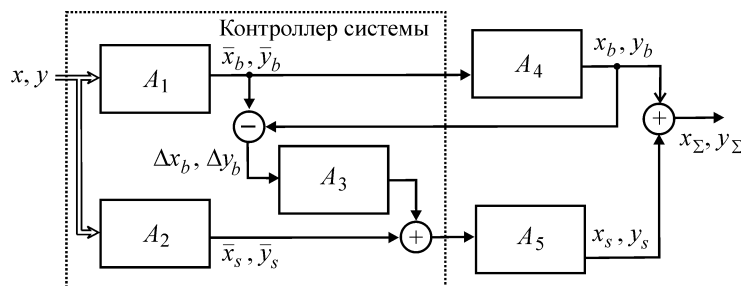


Рис. 1

лазерного луча  $x_{\Sigma} = x_b + x_s, y_{\Sigma} = y_b + y_s$  в большом поле записи. Ошибка позиционирования (на примере координаты  $x$ )

$$\delta_x = x - x_{\Sigma} = x - (A_1 A_4 x + A_5 x (A_2 + A_1 A_3 (1 - A_4)))$$

может быть минимизирована за счет выбора алгоритмов обработки данных с помощью блоков  $A_1, A_2$  и  $A_3$ .

Определим требуемые алгоритмы управления и характеристики контроллера системы, а также динамику поведения системы в режиме последовательной позонной записи при параметрах, близких к реальным, электромеханических преобразователей, которые управляют положением лазерного луча.

**Система управления движением лазерного луча.** Функциональная схема управления составными сканерами, соответствующая структуре комбинированного управления (см. рис. 1), представлена на рис. 2.

Шаговые приводы, управляемые контроллером и состоящие из шаговых двигателей и их драйверов, обеспечивают перемещение оптической головки (блок  $A_4$ ) с установленными в ней сканерами. Блок  $A_5$  содержит модуль драйвера сканера и гальванометрический сканер, управляющие угловым положением зеркал по координатам  $x$  и  $y$  в поле записи сканирующей головки. Сигнал обратной связи о положении всей оптической головки поступает на вход контроллера, вычисляющего погрешность  $\Delta x, \Delta y$  позиционирования сканирующей головки и выполняющего преобразования с помощью блоков  $A_1, A_2$  и  $A_3$ .

Рассмотрим особенности функционирования блоков  $A_4$  и  $A_5$ .

Процесс установления в заданную позицию узлов с ШП (блок  $A_4$ ) определяется электромеханическими характеристиками двигателя и эквивалентным моментом инерции нагрузки при максимальной ошибке, лежащей внутри полного шага [3].

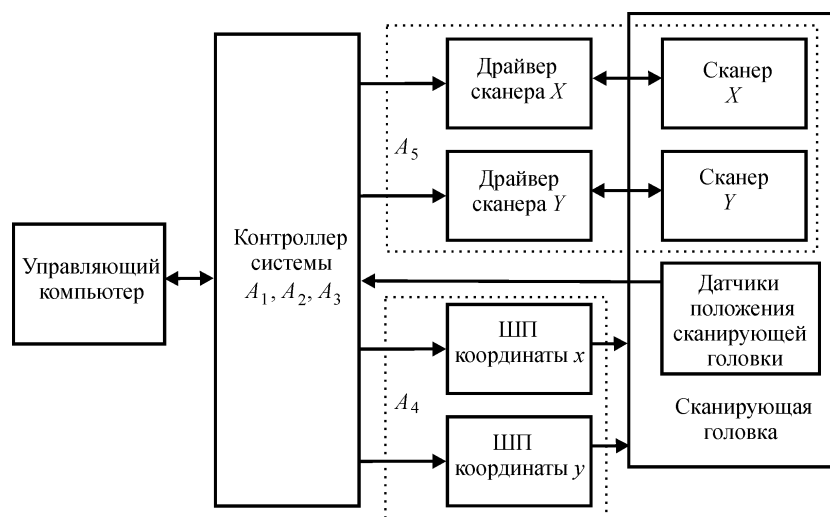


Рис. 2

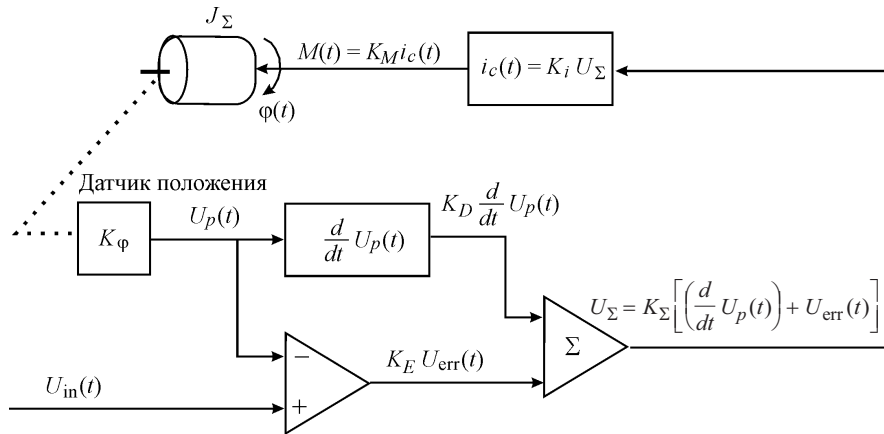


Рис. 3

Аппроксимируем ошибку позиционирования шагового привода  $\Delta x_b$  следующей функцией [3]:

$$\Delta x_b(t) = A e^{at} \sin(2\pi\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Измерения ошибки позиционирования после перемещения сканирующей головки реального устройства в заданную позицию по  $Y$  с помощью ШП с единичным шагом 140 мкм дают следующие параметры уравнения (1):  $A = 0,21$ ;  $a = -0,03 \cdot 10^3$ ;  $\omega = 54$ ;  $\varphi = 0$ .

Упрощенная структурная схема драйвера сканера, содержащего пропорциональный и дифференциальный блоки (на примере драйвера СВ 678Х фирмы "Cambridge Technology, Inc."), представлена на рис. 3 (блок  $A_5$ ). Поясним обозначения на структурной схеме:  $U_{in}(t)$  – управляющее напряжение на входе системы (сигнал с выхода контроллера);  $U_p(t)$  – напряжение с датчика обратной связи, пропорциональное углу поворота оси сканера;  $U_{err}$  – напряжение ошибки;  $K_\phi$  – масштабный коэффициент датчика положения;  $K_E$ ,  $K_D$  – коэффициенты передачи умножителя ошибки и дифференциатора;  $K_i$  – коэффициент передачи усилителя мощности;  $M(t)$  – крутящий момент на валу сканера;  $K_M$  – коэффициент пропорциональности;  $\varphi(t)$  – угол поворота оси сканера;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции, равный сумме момента инерции ротора  $J_r$  и момента инерции нагрузки  $J_{load}$ .

Передаточная функция, реализованная в драйвере, имеет вид

$$U_\Sigma = K_\Sigma \left[ K_D \left( \frac{d}{dt} U_p(t) \right) + K_E (U_{in}(t) - U_p(t)) \right]. \quad (2)$$

Допуская, что момент на валу пропорционален току и постоянная времени катушки сканера мала по сравнению с постоянной времени системы, а также не учитывая противоЭДС, можно записать

$$\frac{J_\Sigma K_\phi}{K_i K_E K_\Sigma K_M} \frac{d^2}{dt^2} U_p(t) + \frac{K_D}{K_E} \frac{d}{dt} U_p(t) + U_p(t) = U_{in}(t) \quad (3)$$

или в операторной форме

$$U_p(p) = \frac{B_2}{p^2 + B_1 p + B_2} U_{in}(p), \quad (4)$$

где

$$B_1 = \frac{K_i K_D K_\Sigma K_M}{J_\Sigma K_\phi}; \quad B_2 = \frac{K_i K_E K_\Sigma K_M}{J_\Sigma K_\phi}.$$

Тогда переходная функция системы

$$G(p) = \frac{B_2}{p(p^2 + B_1 p + B_2)} = \frac{F_1(p)}{pF_2(p)},$$

где  $F_1(p) = B_2$ ,  $F_2(p) = p^2 + B_1 p + B_2$ .

Преобразуя изображение в оригинал, получим

$$g(t) = \frac{F_1(0)}{\frac{d}{dt} F_2(0)} + \sum_k \frac{F_1(p_k)}{p_k \left( \frac{d}{dt} F_2(p_k) \right)} e^{p_k t}. \quad (5)$$

Здесь  $p_k$  – корни полинома  $F_2(p)$ .

Применяя интеграл Дюамеля, получим отклик системы  $U_p(t)$  на входное воздействие  $U_{in}(t)$  (считая систему линейной) (3):

$$U_p(t) = U_{in}(0)g(t) + \int_0^t \left( \frac{d}{d\tau} U_{in}(\tau) \right) g(t-\tau) d\tau. \quad (6)$$

С использованием данной модели можно рассчитать траектории одно- и двухкоординатного сканирования с различными вариантами нагрузки, параметрами сканеров и настройками драйверов. Для этого используем следующие выражения:

$$\begin{aligned} x_s(t) &= U_{in_x}(0)g_x(t) + \int_0^t \left( \frac{d}{d\tau} U_{in_x}(\tau) \right) g_x(t-\tau) d\tau; \\ y_s(t) &= U_{in_y}(0)g_y(t) + \int_0^t \left( \frac{d}{d\tau} U_{in_y}(\tau) \right) g_y(t-\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $g_x(t)$ ,  $g_y(t)$  – переходные характеристики.

Осциллограмма реакции реальной системы «драйвер + сканер» (1) на ступенчатое воздействие приведена на рис. 4. Параметры и настройки системы следующие:  $J_r = 0,125 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>2</sup>,  $J_{load} = 0,117 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>2</sup>,  $K_M = 6,17 \cdot 10^{-3}$  Н·м/А,  $K_i = 42,5$  А/В,  $K_\phi = 0,5\pi/180$  В/рад,  $K_D = 0,81 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_E = 0,036$ . На рисунке представлена также осциллограмма реакции сканера (2), рассчитанная с помощью модели с такими же параметрами, как у реаль-

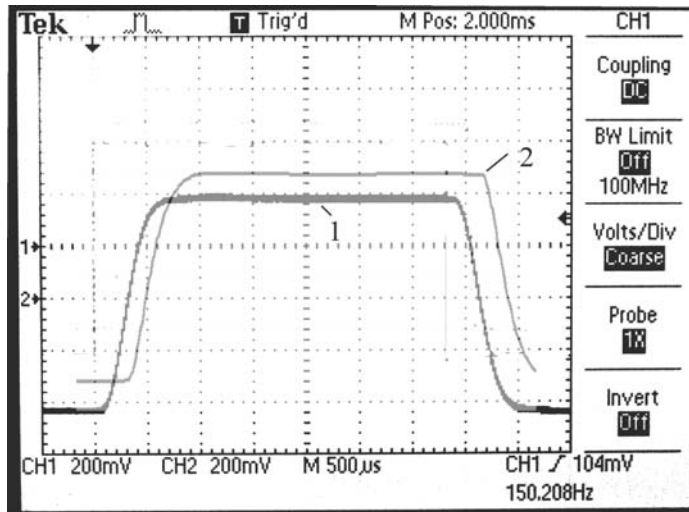


Рис. 4

ной системы. Сравнение экспериментальных (1) и расчетных (2) результатов (см. рис. 4) показало, что модель хорошо описывает реальное поведение системы для различных типов сканеров, нагрузки и настроек драйверов. Максимальная разница между расчетными и экспериментальными данными составляет не более 5 %.

При разработке структуры системы управления, представленной на рис. 1, считалось, что зависимость перемещения лазерного луча от управляющего сигнала в сканирующей головке линейна и оси координат сканирующей головки совпадают с осями координат «большого» поля записи. Однако реальные системы отклонения лазерного луча на основе угловых зеркальных дефлекторов и фокусирующего объектива не обеспечивают необходимые линейность и геометрию. Для коррекции указанных искажений предложена следующая методика.

Известно [4, 5], что система двухкоординатного сканирования, содержащая два угловых дефлектора, дает значительные (3–10 %) геометрические искажения – дисторсию.

Эти искажения связаны с тем, что зависимость координаты пучка на плоскости от угла поворота зеркала имеет тангенциальный характер; перемещение пучка по координатам  $x$  и  $y$  осуществляется двумя разнесенными по оптической оси зеркалами.

В этом случае координаты луча на плоскости в зависимости от угла поворота зеркал и расстояния между ними можно рассчитать [6]:

$$x = (\sqrt{D^2 + y^2} + e) \operatorname{tg} \theta_x, \quad y = D \operatorname{tg} \theta_y,$$

где  $\theta_x, \theta_y$  – углы отклонения зеркал;  $D$  – расстояние от зеркала сканера  $Y$  до фокальной плоскости;  $e$  – расстояние между зеркалами.

Кроме искажений, обусловленных геометрией развертывающей системы, всегда присутствуют aberrации объектива и погрешности юстировки, что создает трудности для нахождения корректирующих коэффициентов аналитическим путем. Даже если аналитическое выражение для геометриче-

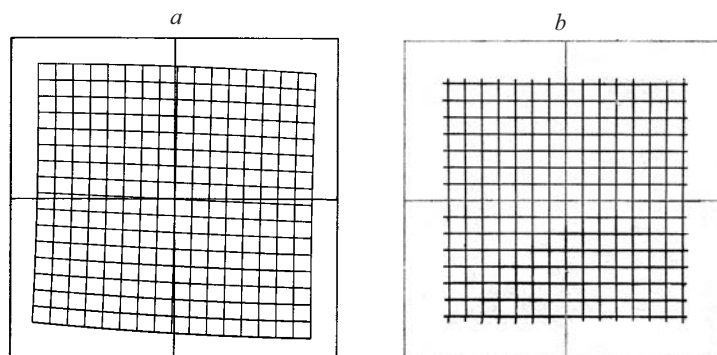


Рис. 5

ских искажений найдено, то обычно оно представляет собой полином третьей степени, а следовательно, расчет коэффициентов требует больших временных затрат и вычислительной мощности. Таким образом, в данном случае более эффективным является табличный метод коррекции. Для получения таблицы поле записи сканирующей головки разбивается ортогональными прямыми на квадраты и для каждого узла пересечения прямых вычисляются корректирующие коэффициенты по тестовому изображению с последующим нахождением корректирующих коэффициентов внутри квадрата методом линейной интерполяции по угловым точкам.

В результате экспериментальной проверки методов коррекции в поле записи сканирующей головки выбран и реализован вариант табличной коррекции (таблица размерностью  $17 \times 17$ ). Запись тестового изображения с помощью сканирующей головки с полем  $50 \times 50$  мм приведена на рис. 5, *a*, *b*: исходное изображение без применения коррекции (*a*) и с применением коррекции (*b*). Полный размер изображения  $60 \times 60$  мм, толщина линии 75 мкм. Максимальное значение погрешности после коррекции составляет 20 мкм при общем размере поля записи  $50 \times 50$  мм (0,04 %).

**Разработка аппаратно-программных средств управления составными сканаторами.** Учитывая структуру управления, представленную на рис. 1, и функциональную структуру системы (см. рис. 2), определим основные функции контроллера.

1. Преобразование данных об изображении и заданных параметров записи в аналоговые сигналы управления позицией оптических дефлекторов с использованием алгоритма управления, минимизирующего погрешность позиционирования в большом поле записи.

2. Пересчет координат элементов изображения по таблице (геометрическая коррекция координат).

3. Дискретизация сигналов с датчиков положения сканирующей головки с частотой не менее 100 кГц и разрядностью не хуже 12. Вычисление погрешности позиционирования и коррекция координат векторов.

4. Управление ШП.

Структурная схема разработанного контроллера приведена на рис. 6. Ядро контроллера представляет собой специализированный высокопроизводительный 32-разрядный цифровой сигнальный процессор TMS320F2812 фирмы "Texas Instruments" с тактовой частотой 150 МГц. Достоинствами



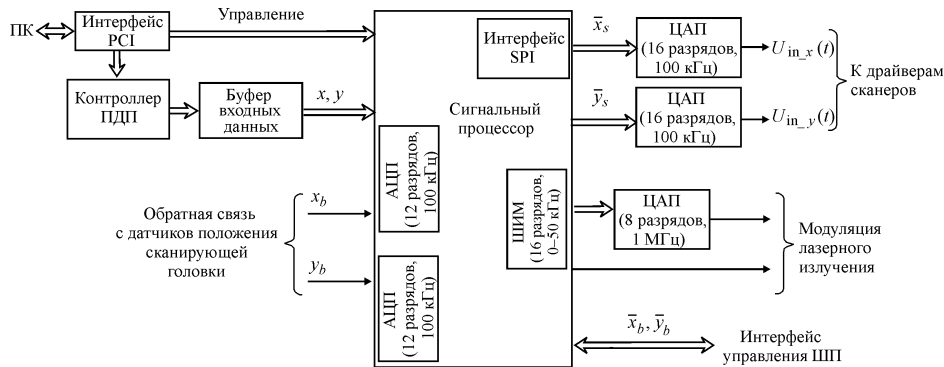


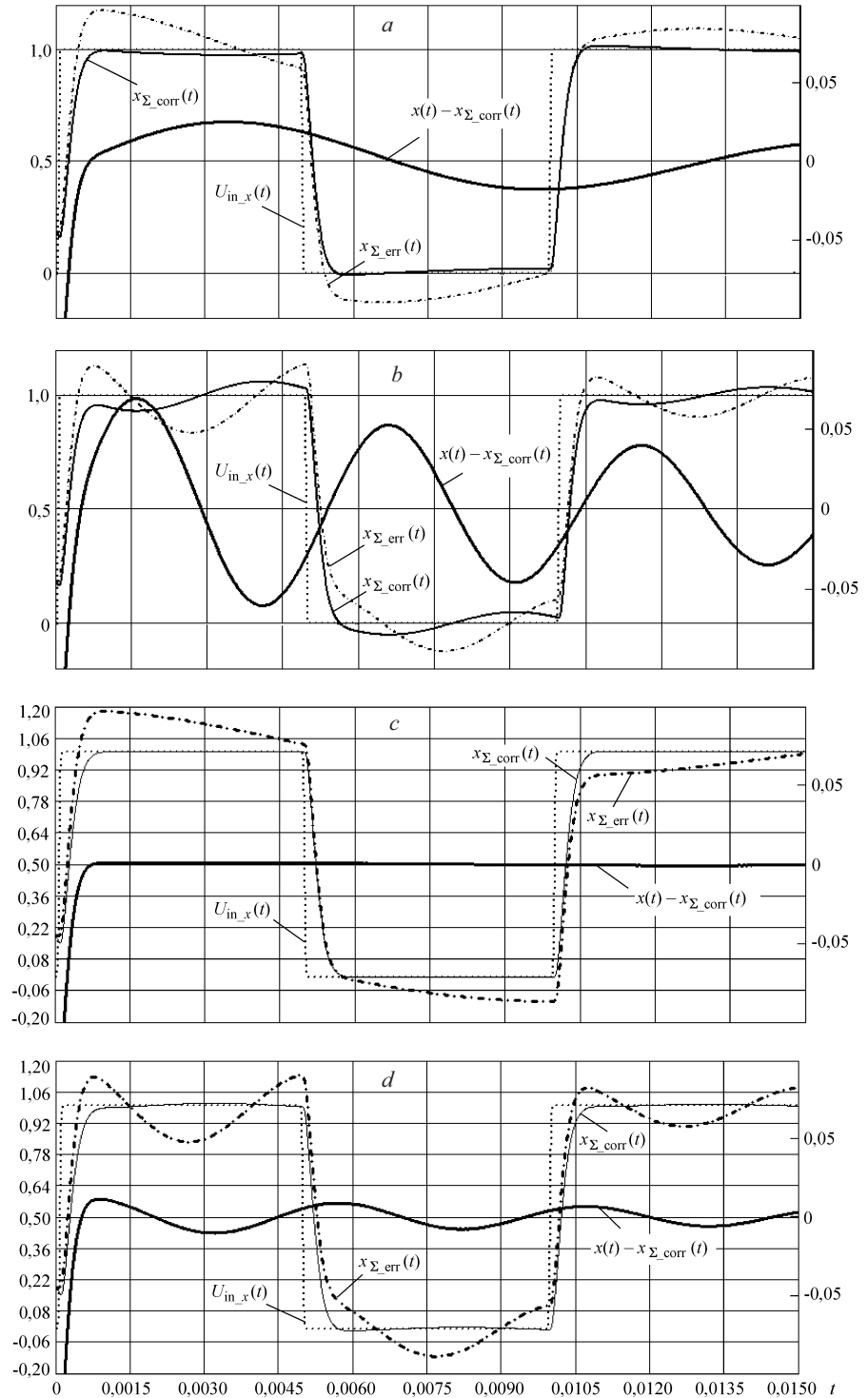
Рис. 6

сигнального процессора для вышеперечисленных функций являются: выполнение практически всех инструкций (в том числе и 32-разрядного умножения) за один такт, одноканальный доступ к оперативной памяти, наличие скоростного (5 МГц) 12-разрядного АЦП. FLASH-память объемом 128 Кслов с возможностью «горячего» перепрограммирования позволяет быстро адаптировать контроллер к решению конкретной задачи. Контроллер управления сканерами принимает команды, исходные данные от персонального компьютера (ПК) и передает ему информацию о своем текущем состоянии. Соединение контроллера с ПК осуществляется по внутренней шине РС1. Входные данные передаются в контроллер в режиме прямого доступа к памяти (ПДП) и буферизуются для обеспечения непрерывности процесса записи.

Сигнальный процессор преобразует исходные данные в цифровые команды управления сканерами, которые затем по последовательному синхронному порту (SPI) процессора поступают на блок цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) драйвера управления сканерами и контроллером перемещений. Сигналы обратной связи с драйверов сканеров по позиции и скорости поступают на 12-разрядный АЦП. Для управления лазером в контроллере используется широтно-импульсный модулятор (ШИМ) сигнального процессора.

**Моделирование процессов управления.** Для определения алгоритма управления составными сканерами, который позволил бы обеспечить требуемые точностные характеристики системы, создана математическая модель, учитывающая особенности управления угловыми дефлекторами (7) и ошибку управления ШП в соответствии с уравнением (1). С помощью этой модели исследовались алгоритмы управления угловыми дефлекторами, оптимизирующие быстродействие системы в режиме разбиения изображения на зоны и последовательного обхода зон. Момент включения режима компенсации динамической ошибки совпадал с моментом подачи последнего шага для выхода в заданную зону. Моделирование проводилось для сканеров СТ 6240 с параметрами  $J_r = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2$ ,  $J_{\text{load}} = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2$ ,  $K_M = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м/А}$  и драйверов СТ 678Х с настройками  $K_i = 52 \text{ А/В}$ ,  $K_\varphi = 0,5\pi/180 \text{ В/рад}$ ,  $K_D = 0,036 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_E = 0,15$ . При построении модели были сделаны следующие допущения: задержка получения данных о реальном по-





*Рис. 7*

ложении сканирующей головки и время вычисления корректирующим блоком  $A_3$  равны нулю, погрешность датчика положения сканирующей головки считается бесконечно малой относительно погрешности позиционирования сканирующей головки.

Алгоритм 1.  $A_3$  – блок пропорционального управления.

Шаг 1. По данным о текущей позиции сканирующей головки с датчика линейного перемещения вычисляется значение погрешности  $\Delta x_b = \bar{x}_b - x_b$ .

Шаг 2. Найденное значение погрешности  $\Delta x_b$  преобразуется в управляющий гальванометрическим сканером сигнал  $U_{in}(t)$  в системе координат малого поля записи.

Зависимости  $U_{in}(t)$ ,  $x_{\Sigma\_err}(t)$ ,  $x_{\Sigma\_corr}(t)$ ,  $\Delta x(t)$ , полученные в результате моделирования алгоритма 1 для координаты  $x$ , приведены на рис. 7, *a* (здесь  $U_{in}(t)$  – управляющее воздействие без коррекции;  $x_{\Sigma\_err}(t) = x(t) + \Delta x_b(t)$ ;  $x_{\Sigma\_corr}(t)$  – смещение лазерного пучка по оси  $X$  с введенной коррекцией;  $\Delta x(t) = x(t) - x_{\Sigma\_corr}(t)$  – ошибка позиционирования после применения коррекции). Значение погрешности  $\Delta x_b$  рассчитывалось по уравнению (1) при  $\omega = 54$ . Те же функции при  $\omega = 100$  представлены на рис. 7, *b*. При моделировании были взяты следующие параметры системы: частота выдачи сигналов на сканер 10 кГц, задержка передачи сигнала на сканер 10 мкс. Как видно из графиков, при таком варианте коррекции погрешность достигает 20 мкм, что связано с задержкой корректирующего сигнала. Кроме того, с ростом частоты погрешность значительно увеличивается. Известно [7], что введение регулирования по производной позволяет уменьшить такие ошибки.

Алгоритм 2. Регулирование с использованием пропорционального ( $A_{3,1}$ ) и дифференциального ( $A_{3,2}$ ) блоков.

В результате введения такого элемента регулирования ошибка уменьшилась приблизительно в 5 раз, как следует из рис. 7, *c, d*, что было подтверждено и в ходе экспериментальной проверки.

**Заключение.** Применение рассмотренной структуры составного сканирования и реализация алгоритмов управления с помощью специализированного контроллера на базе быстродействующего цифрового сигнального процессора в реальных системах записи позволили создать ряд систем с уникальными характеристиками по быстродействию и точности.

Одна из таких систем (система микроперфорации, разработанная в Институте автоматики и электрометрии СО РАН) имеет следующие характеристики: общий размер поля записи  $300 \times 200$  мм, размер поля записи скани-

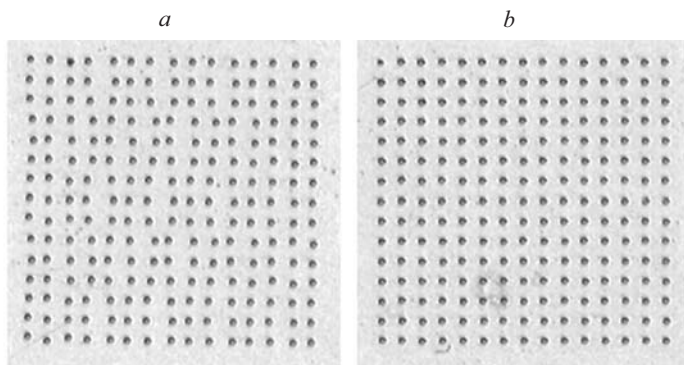


Рис. 8

рующей головки до  $10 \times 10$  мм, точность позиционирования по всему полю записи не менее 20 мкм, скорость записи в поле сканирующей головки до 3 м/с. Для получения максимальных скоростей записи применены зеркальные оптические дефлекторы СТ 6240 фирмы “Cambridge Technology, Inc.” с датчиками углового положения сканирующих зеркал.

Фрагмент микроперфорации, выполненной с использованием созданной установки, приведен на рис. 8, *a*, *b*: запись изображения без применения коррекции динамических искажений (*a*), тот же участок изображения, но с применением коррекции, в результате чего фактическое отклонение положения отверстий составило не более 10 мкм (измерения выполнялись с помощью микроскопа с цифровым измерением перемещения, цена деления 1 мкм) (*b*). Размер поля записи сканирующей головки  $1 \times 1$  мм, расстояние между отверстиями задано 250 мкм по вертикали и горизонтали, размер отверстия порядка 100 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schaeffer R.** Galvo based laser scanning systems // CircuiTree. 2003. **16**, N 9. P. 32.
2. **Галуев С. В., Розов Б. С.** Составные сканаторы // Измерения, контроль, автоматизация. 1983. № 3. С. 33.
3. **Кенио Т.** Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Гибин И. С., Гофман М. А., Карапузиков А. И. и др.** Анализ оптических схем двухкоординатных шлейфовых дефлекторов // Автометрия. 1975. № 3. С. 53.
5. <http://www.gsig.com>
6. **Tang Y.** Accuracy analysis and improvement for direct laser sintering // Chinese Journ. Lasers. 2003. **30**, N 3. P. 216.
7. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1978.

*Поступила в редакцию 13 июля 2006 г.*