

УДК 681.515 : 681.787

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ
УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ
КРУГОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗАПИСЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА***

Д. Э. Денк¹, А. Г. Полещук²

¹*Институт технической оптики, Университет Штутгарта,
Pfaffenwaldring, 9, 70569 Stuttgart, Deutschland
E-mail: denk@ito.uni-stuttgart.de*

²*Учреждение Российской академии наук
Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su*

Рассмотрены особенности работы системы автоматической фокусировки кругового лазерного записывающего устройства CLWS-300IAE. Проведено исследование влияния погрешности фокусировки на процесс прямой лазерной записи дифракционных структур. Описан и экспериментально исследован цифровой адаптивный регулятор для системы автоматического регулирования фокусировки. Приведены алгоритмы работы регулятора, методика настройки и экспериментальные результаты.

Ключевые слова: лазерная запись, автоматическая фокусировка, дифракционная оптика, система автоматического регулирования.

Введение. Из многих известных в настоящее время способов изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ) наибольшей универсальностью и точностью обладает способ, основанный на взаимном перемещении (круговом или линейном) сфокусированного пучка лазера и покрытой светочувствительным материалом оптической пластинки [1].

Для записи дифракционных микроструктур с характерными размерами менее 0,5 мкм необходимо использовать фокусирующие микрообъективы с числовой апертурой $NA = 0,65-0,90$ и, как следствие, с малой глубиной резкости ($< 0,5$ мкм). Торцевые биения подложки изготавливаемого ДОЭ, превышающие глубину резкости, приводят к изменению параметров формируемого фазового рельефа. Устранить влияние биений можно лишь путем непрерывного поддержания точки фокусировки на поверхности подложки. Эта задача решается в дисковых устройствах записи/считывания информации (CD, DVD и др.) [2], где широкое распространение получили методы автоматической фокусировки (АФ), использующие принципы систем автоматического регулирования. Лазерные записывающие устройства (ЛЗУ), предназначенные для изготовления ДОЭ, имеют ряд специфических требований, которые предъявляются к системам АФ:

- более высокая точность поддержания точки фокусировки на поверхности регистрирующей среды;
- долговременная стабильность поддержания точки фокусировки;
- необходимость исключения влияния записываемой на регистрирующей среде дифракционной структуры на работу АФ;

*Работа выполнена при частичной поддержке Сибирского отделения РАН (проекты № 54 и № 55) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-01065-а).

— запись на нестандартных подложках (разрывы поверхности, изменение коэффициента отражения и т. п.);

— достаточно большая масса фокусирующего микрообъектива и высокая жесткость его подвески в исполнительном элементе, обусловленная требованиями к отсутствию перекосов при перемещении.

Известные методы АФ не обеспечивают достаточно полного выполнения указанных требований [2]. Совершенствование методов фокусировки позволит решить задачу создания прецизионных устройств для изготовления ДОЭ.

Целью данной работы является исследование влияния расфокусировки фокусирующего объектива ЛЗУ на процесс записи дифракционных структур и создание цифровой системы автоматического регулирования фокусировки кругового лазерного фотопостроителя [3, 4], обеспечивающей высокую точность поддержания точки фокусировки на поверхности регистрирующей среды. Полученные результаты могут быть также применены при конструировании широкого класса цифровых систем автоматического регулирования.

Система автоматического регулирования ЛЗУ CLWS-300IAE [4] показана на рис. 1. Световой поток полупроводникового лазера (ПЛ) коллимируется микрообъективом O_1 , проходит светоделительные зеркала ($СД_1$ и $СД_2$) и поступает к фокусирующему микрообъективу O_2 , механически связанному с исполнительным элементом (ИЭ) автофокусировки [5]. Оптическая ось системы АФ образует с осью канала записи некоторый угол (около $1,5^\circ$), благодаря которому точки фокусировки излучения записывающего аргонового и вспомогательного ПЛ отстоят друг от друга на поверхности оптической пластины на расстоянии $d = 25 - 50$ мкм. Отраженное от поверхности пластины излучение ПЛ воспринимается микрообъективом O_2 и направляется с помощью зеркал $СД_1$, $СД_2$ и призмы к объективу O_3 , который фокусирует его на фоточувствительную поверхность сдвоенного фотоприемника (ФП). Если поверхность пластины точно совпадает с фокальной плоскостью микрообъектива O_2 , то световой поток направляется объективом O_3 точно на границу раздела ФП. В этом случае выходные напряжения обоих ФП (U_a и U_b) равны и их разность близка к нулю. Если же поверхность регистрирующей среды смещена относительно фокальной плоскости микрообъектива, то световой поток будет выходить из него под некоторым углом, зависящим от величины и знака расфокусировки. Точка

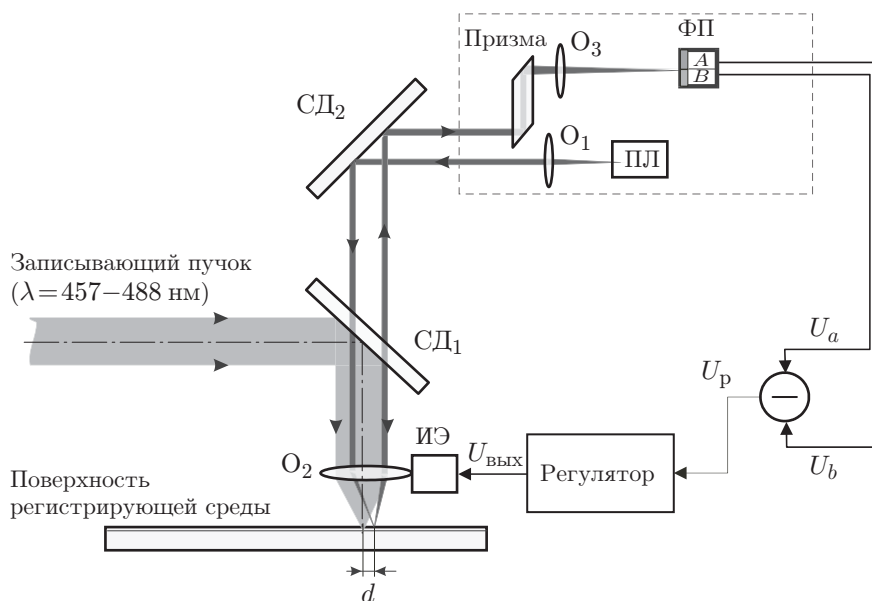


Рис. 1. Система автоматической фокусировки лазерного записывающего устройства

фокусировки излучения на поверхности ФП смещается относительно границы раздела, и на выходе появляется напряжение рассогласования (ошибки фокусировки) $U_p = U_a - U_b$, знак которого однозначно связан с направлением расфокусировки, а величина пропорциональна величине расфокусировки. Разностный сигнал ошибки фокусировки поступает на вход регулирующего устройства (регулятора). После усиления и частотной коррекции этот сигнал подается к ИЭ, который перемещает фокусирующий микрообъектив вдоль оптической оси вслед за смещенной поверхностью так, чтобы рассогласование стремилось к нулю. Указанные элементы образуют замкнутую систему автоматического регулирования фокусировки.

Точность работы системы автоматической фокусировки. При разработке дисковых устройств записи/считывания [2] учитывается, что остаточная величина расфокусировки δ не должна превышать глубину резкости Δh фокусирующего объектива:

$$\Delta h = \lambda / (NA)^2, \quad (1)$$

где λ — длина волны записывающего лазера, а NA — числовая апертура фокусирующего объектива. Если $\lambda = 488$ нм, $NA = 0,65$, то $\Delta h \sim 1,0$ мкм, а в перспективных системах записи при $\lambda = 266$ нм, $NA = 0,95$ величина $\Delta h \sim 0,3$ мкм.

Оценка (1) справедлива для записи или считывания бинарной информации. Однако для прямой лазерной записи [6] рельефных или полутонковых структур в тонких пленках фоторезиста или хрома требуется более высокая точность работы системы АФ.

Исследование влияния погрешности фокусировки на процесс записи было выполнено на ЛЗУ типа CLWS-300IAE [4] с описанной выше системой АФ. Результаты исследования записи термохимическим методом простейшего элемента — дуги с различной величиной дефокусировки — приведены на рис. 2. Для записи использовалась пленка хрома магнетронного распыления толщиной 70 нм, нанесенная на подложку из кварцевого стекла КУ-2. Мощность излучения при записи последовательно уменьшалась, начиная с $P = 100$ мВт, с шагом 2 мВт. Скорость движения записывающего пятна относительно пленки хрома $v = 3,5$ м/с. Записывались группы дуг с параметрами: период 2 мкм, длина 25 мкм. После записи пленка проявлялась в селективном травителе хрома [7].

Из рис. 2 следует, что расфокусировка приводит к быстрому уменьшению количества записанных треков, так как при лазерной термохимической записи существует достаточно

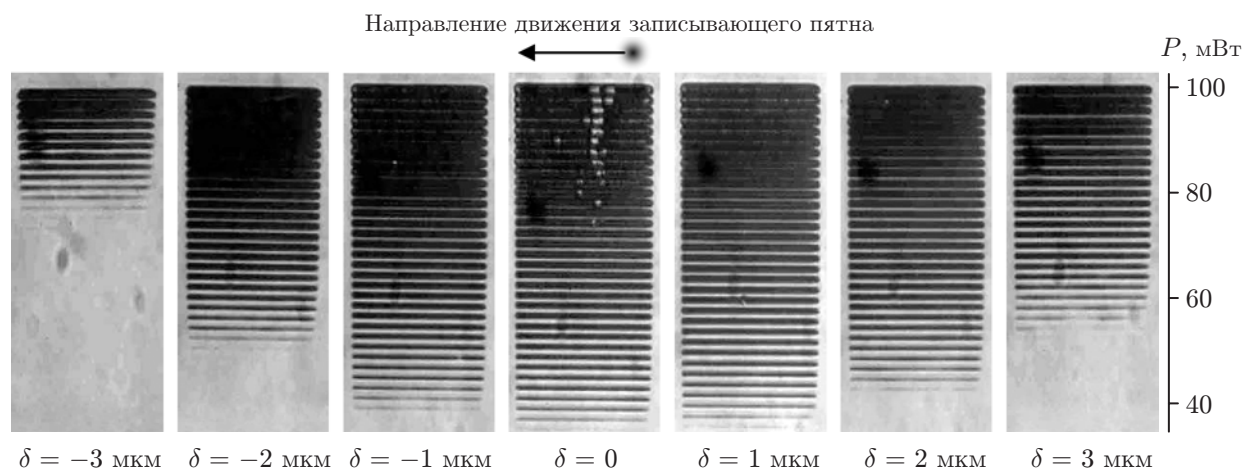


Рис. 2. Микрофотографии тестовых структур, записанных при величине дефокусировки δ , изменяющейся от -3 до $+3$ мкм

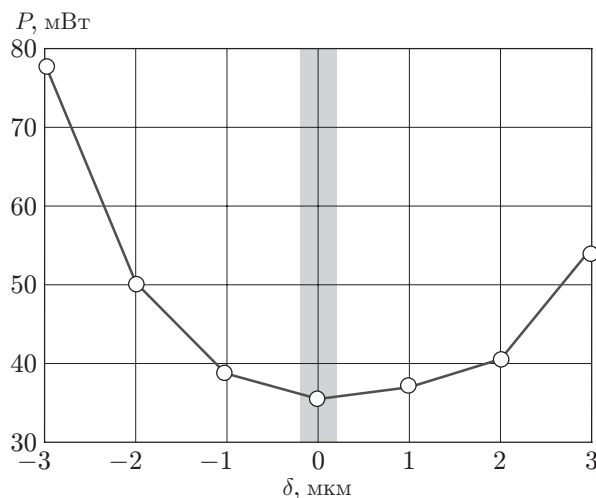


Рис. 3. Мощность лазерного излучения для записи линий шириной 0,6 мкм

четко выраженный порог [8]. На рис. 3 показана зависимость мощности лазерного излучения, необходимой для «уверенной» записи линий шириной 0,6 мкм, от величины расфокусировки. Видно, что для записи относительно тонких линий ($\sim 0,6$ мкм) термохимическим методом величина расфокусировки не должна превышать $\pm 0,1$ мкм. На практике величина торцевых биений оптических подложек при записи может достигать 10–20 мкм и более (скорость вращения 15 об/с). При этом система автоматического регулирования с замкнутой обратной связью должна обеспечивать устойчивое подавление расфокусировки свыше $(1-2) \cdot 10^2$ раз на частоте 15 Гц и частоте единичного усиления ~ 1 кГц. Увеличить точность работы системы АФ можно, используя особенности процесса лазерной записи при изготовлении дифракционных элементов.

Особенности процесса записи с использованием ЛЗУ. Особенностью метода записи дифракционных структур с помощью ЛЗУ типа CLWS-300IAE является строго периодичное круговое сканирование [3, 4] записывающим лазерным пучком (шаг записи $\sim 0,5$ мкм). При достаточно большом радиусе записи закон изменения расфокусировки в зависимости от угла поворота подложки между двумя соседними круговыми проходами (треками) меняется очень слабо. Типичные примеры сигнала ошибки (расфокусировки) системы АФ, полученные при перемещении головки записи с радиуса $R = 18$ мм до радиуса 32 мм с шагом 4–6 мм, приведены на рис. 4. Видно, что зависимость величины сигнала ошибки от угла поворота пластины сохраняется на различных радиусах записи. Так как шаг записи обычно составляет 0,5 мкм, можно утверждать, что эта зависимость на соседних проходах практически неизменна.

В таком случае для минимизации расфокусировки целесообразно использовать принципы разомкнутых систем автоматического регулирования (САР) — регулировка по «возмущению» [9] (регулировка вперед). Системы регулирования по возмущению в сравнении с системами, действующими по отклонению (т. е. системами с обратной связью), отличаются обычно большими устойчивостью и быстродействием. Однако наибольшими преимуществами обладают комбинированные САР, сочетающие в себе принципы регулирования по отклонению и по возмущению [10] (feedforward control).

Комбинированный адаптивный регулятор. В настоящее время самым распространенным типом регулятора, обеспечивающим высокую точность управления различными процессами, является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. С развитием вычислительной техники широкое распространение получили цифровые ПИД-регуляторы [11, 12]. Простота регуляторов позволяет реализовать их на широком

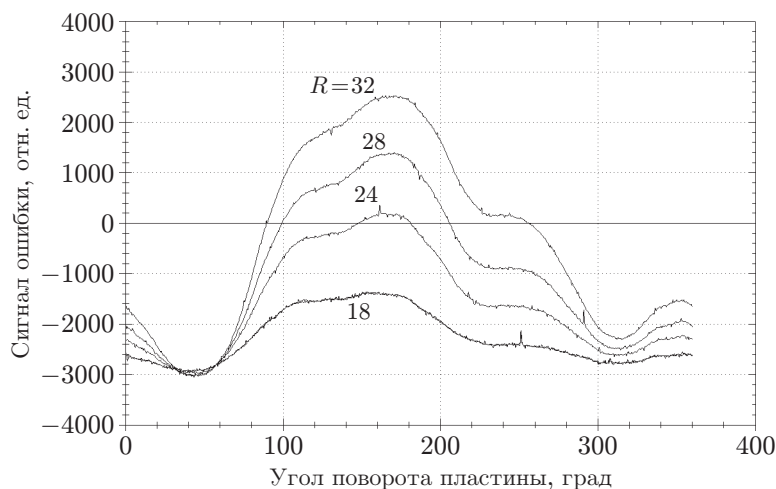


Рис. 4. Типичные сигналы ошибки системы АФ на разных радиусах R при скорости вращения пластины 11 об/с

спектре микроконтроллеров или программируемых логических матриц (ПЛМ). Основным достоинством цифрового регулятора является возможность изменения коэффициентов программным путем, что позволяет автоматизировать процесс настройки [13–15]. Для расширения диапазона частот передаточной характеристики применяется каскадирование ПИД-регуляторов или создаются регуляторы более высоких порядков, например ПИ²Д. Однако при этом регулятор теряет простоту настройки и требует больших вычислительных ресурсов.

Принцип работы комбинированного регулятора системы АФ основан на запоминании предыдущего сигнала управления и использовании его как опорного при следующем сканировании (или треке), т. е. регулятор будет адаптироваться к систематической ошибке и пытаться ее полностью компенсировать. Структурная схема предложенного адаптивного регулятора показана на рис. 5.

Адаптивный регулятор состоит из ПИД-регулятора и блока коррекции, представляющего собой буфер памяти (БП), запись в который производится по сигналу синхронизации от сканирующей системы, и низкочастотный фильтр (Ф). Для настройки и оценки качества работы регулятора в схему введен тестовый генератор (Г), который тоже синхронизируется от сканирующей системы (SC — синхроимпульсы). Ключи $K_1 - K_3$ позволяют

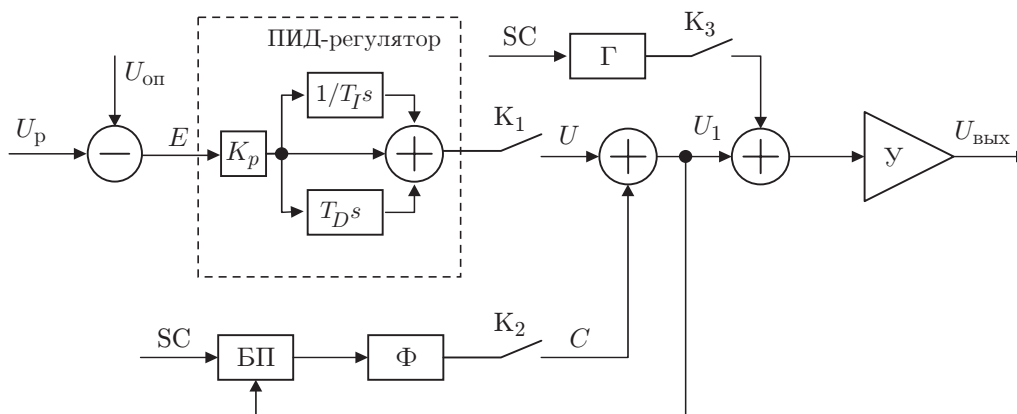


Рис. 5. Упрощенная схема адаптивного регулятора

изменять режимы работы регулятора: подача тестового сигнала на исполнительный элемент — K_1, K_2 разомкнуты, K_3 замкнут; регулятор выключен — $K_1 - K_3$ разомкнуты; обычный ПИД-регулятор — K_1 замкнут, K_2 разомкнут; адаптивный регулятор — K_1, K_2 замкнуты; проверка настройки регулятора — при включенном регуляторе K_3 замкнут.

Сигнал рассогласования U_p (см. рис. 1) вычитается из опорного сигнала $U_{оп}$ и как сигнал ошибки E поступает на вход ПИД-регулятора. Сигнал управления U суммируется с сигналом коррекции C , образуя новый сигнал управления U_1 , действующий через усилитель Y на ИЭ.

ПИД-регулятор характеризуется передаточной функцией, которая записывается в идеальном виде:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right), \quad (2)$$

где $E(s)$ — сигнал ошибки; $U(s)$ — сигнал управления; T_I, T_D — постоянные времени интегрирующего и дифференцирующего звеньев; K_p — коэффициент усиления.

Передаточная функция адаптивного регулятора будет выглядеть как

$$G_A(s) = \frac{U_1(s)}{E(s)} = \frac{U(s) + X_C(s)}{E(s)} \quad (3)$$

и зависеть от сигнала коррекции X_C . Если сигнал коррекции для текущего трека пропорционален сигналу ошибки на предшествующем пройденном треке, то сигналы ошибок будут также слабо различаться. Сравнив численные значения (2) и (3) на одной и той же частоте f , получим $G_A(s)_f > G(s)_f$. Основным требованием в данном случае является постоянство скорости сканирования. Оно обусловлено частотной зависимостью ПИД-регулятора.

Чтобы не учитывать в дальнейшем передаточную функцию ИЭ $P(s)$, удобно воспользоваться полной передаточной функцией системы регулирования, которая будет выражать коэффициент усиления по петле обратной связи:

$$K(s) = G(s)P(s) = E_0(s)/E(s),$$

где $P(s) = 1$, $E_0(s)$ — сигнал ошибки при выключенном регуляторе.

Работу регулятора можно проиллюстрировать на примере сигнала ошибки, приведенном на рис. 6.

На первом проходе кругового трека сигнал компенсации X_C равен нулю и регулятор ведет себя как обычный ПИД-регулятор:

$$E_1(s) = E_0(s)(1/K(s)).$$

При проходе следующего трека сигнал компенсации равен предыдущему сигналу управления и регулятор будет компенсировать уже меньшую ошибку, но обеспечивать такой же коэффициент усиления по петле обратной связи. Сигнал ошибки при проходе по N трекам будет иметь вид

$$E_N(s) = E_0(s)(1/K(s))^N.$$

Коэффициент усиления по петле обратной связи для N представим в виде

$$K_N(s) = E_0(s)/E_N(s) = K(s)^N. \quad (4)$$

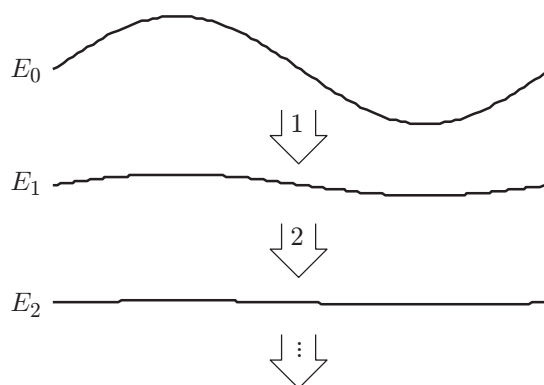


Рис. 6. Улучшение компенсации сигнала ошибки с увеличением количества проходов по одному треку (процесс обучения)

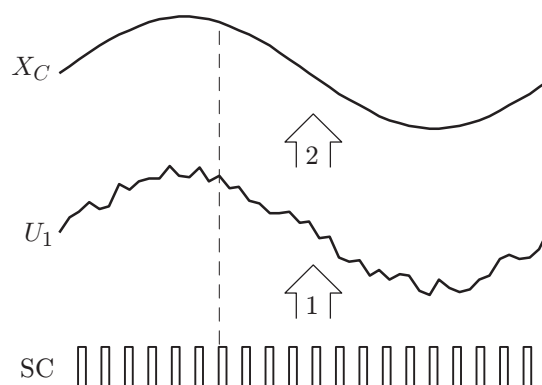


Рис. 7. Формирование сигнала коррекции по сигналу синхронизации

Таким образом, если на частоте f выполняется условие $K(s)_f > 1$, $N \rightarrow \infty$, коэффициент усиления по петле обратной связи на данной частоте $K_N(s)_f$ тоже будет стремиться к бесконечности.

На практике реальный сигнал с датчика ошибки фокусировки не является идеальным, поэтому коэффициент усиления по петле обратной связи ограничивается шумовой составляющей этого сигнала. Максимально возможный коэффициент усиления по петле обратной связи удовлетворяет критерию $K(s) \leq \Psi$, где Ψ — отношение сигнал/шум сигнала ошибки.

Принцип работы корректора показан на рис. 7. По сигналу синхронизации SC в буфер памяти записываются значения сигнала U_1 . Далее происходит фильтрация и полученный сигнал коррекции X_C используется при проходе следующего трека. Необходимый размер буфера N_B можно определить исходя из пороговой частоты f_k , при которой $K(s) = 1$, и частоты сканирования f_{SC} :

$$N_B \geq 2(f_k/f_{SC}). \tag{5}$$

Число двоичных разрядов k должно соответствовать динамическому диапазону входного сигнала и удовлетворять критерию $2^k \geq \Psi$, тогда

$$k \geq \log_2 \Psi. \tag{6}$$

В противном случае регулятор будет различать изменение сигнала коррекции и попытаться его компенсировать, что приведет к ухудшению работы регулятора. Число проходов, после которых уже не будет происходить увеличения коэффициента усиления по петле обратной связи, можно вычислить из условия $K(s)_N = \Psi$ (4):

$$N = \log_{K(s)} \Psi = \lg \Psi / \lg K(s). \tag{7}$$

Число проходов N — величина целая, поэтому для получения правильного результата значение в (7) необходимо округлить до целого в большую сторону.

Использование фильтра также обусловлено наличием шумовой составляющей в сигнале ошибки. Чтобы предотвратить эффект усиления ошибки, необходимо ограничить полосу частот сигнала коррекции, при этом верхняя граница частоты должна быть меньше f_k .

Для фильтрации возможно применение различных алгоритмов [16]. Хороший результат дают фурье- и вейвлет-преобразования. Также возможно применение цифровых КИХ- и БИХ-фильтров. Хотя алгоритмы расчетов фильтров более просты по сравнению с фурье- и вейвлет-преобразованиями и требуют меньшего времени выполнения, они вносят дополнительный фазовый сдвиг в сигнал коррекции, что ухудшает работу регулятора. Компромиссом между скоростью и сложностью реализации может быть алгоритм сглаживания.

Настройка адаптивного регулятора производится в два этапа. Сначала регулятор переводится в режим обычного ПИД-регулятора (K_1 замкнут, K_2 разомкнут) и производится его настройка с использованием описанных в литературе методов [14]. Далее регулятор переводится в адаптивный режим (K_1, K_2 замкнуты) и производится подбор параметров фильтра, которые обеспечивают максимальный коэффициент усиления по петле обратной связи $K(s)$ в заданном диапазоне частот.

Экспериментальные результаты. Данный регулятор был применен в системах АФ ЛЗУ [4] в Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск, Россия) и Институте технической оптики (г. Штутгарт, Германия) [17]. Электронный блок системы АФ выполнен на базе цифровых сигнальных процессоров DSP320F2812 и BF-537E фирм TI и "AnalogDevices" (Германия).

Было проведено два вида экспериментов: моделирование процесса АФ с помощью тестового генератора и реальный эксперимент в действующей установке.

При моделировании тестовый генератор формировал синусоидальный сигнал некоторой частоты, т. е. имитировалось вращение регистрирующей среды с заданной величиной биений. Экспериментальные результаты исследования работы системы АФ представлены на рис. 8, *a* – *c*. Модельный эксперимент проводился при следующих параметрах ЛЗУ: частота вращения регистрирующей среды (сканирования) 10 об/с (10 Гц), размер буфера корректора 1000, число разрядов 16, алгоритм фильтрации — сглаживание в кольцевом буфере, размер окна 24 точки. Относительно небольшой петлевой коэффициент усиления K_{loop} (см. рис. 8, *a*) обусловлен конструкцией примененного ИЭ. Амплитудно-частотная характеристика ИЭ (см. рис. 8, *b*) достаточно линейна в диапазоне частот 0–70 Гц, но имеет резонанс на частоте около 180 Гц. Кроме того, ИЭ обладает механическим гистерезисом. Несмотря на это при применении адаптивного регулятора произошло увеличение

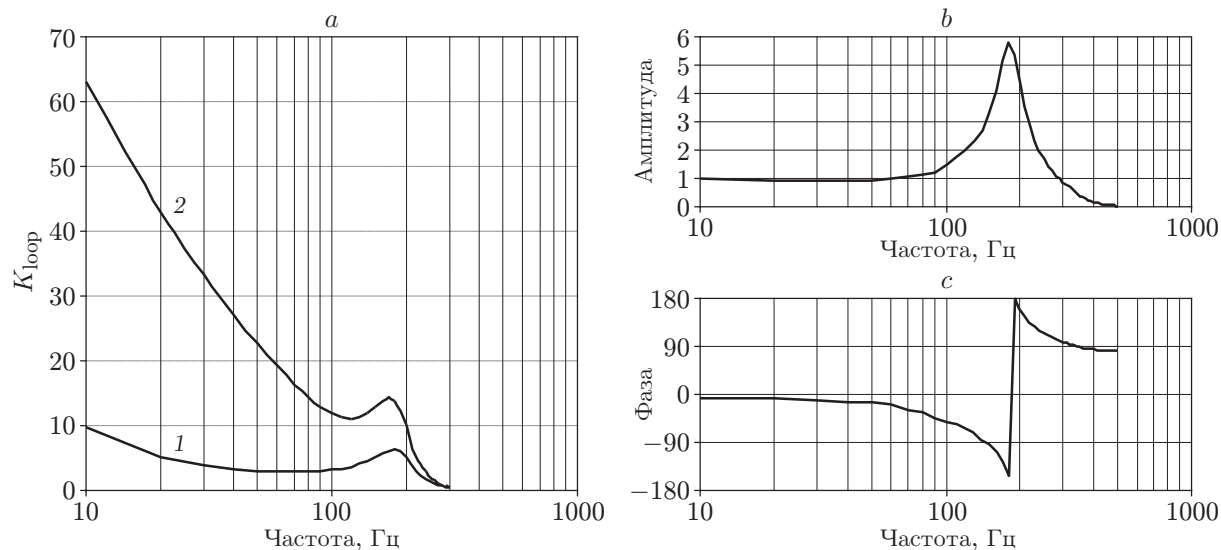


Рис. 8. Результаты модельного эксперимента: *a* — обычный (кривая 1) и адаптивный (кривая 2) ПИД-регуляторы; *b, c* — амплитудно-частотная характеристика ИЭ

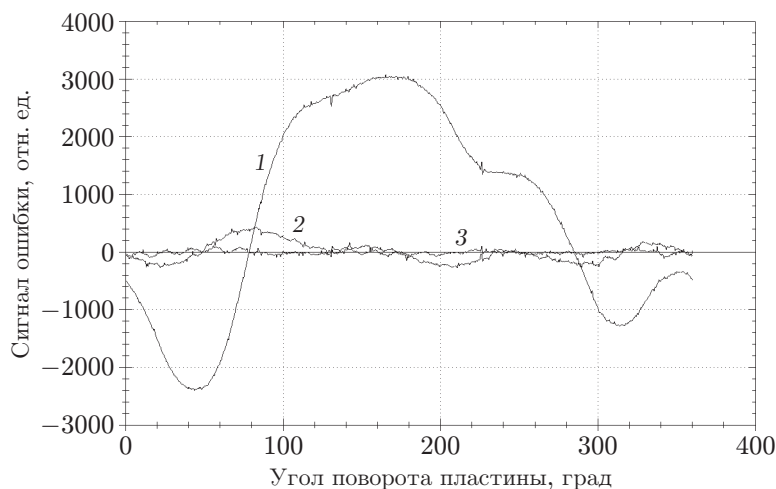


Рис. 9. Примеры сигналов ошибки при выключенной системе АФ (кривая 1), при включенной системе АФ с обычным (2) и адаптивным (3) ПИД-регуляторами

петлевого коэффициента усиления в 6–7 раз по сравнению с обычным ПИД-регулятором.

Результаты экспериментального исследования работы адаптивного регулятора в условиях реальной записи на вращающуюся подложку представлены на рис. 9 и 10 [3, 4]. В качестве регистрирующей среды использовалась стандартная пластина (127 × 127 мм) для фотолитографии, покрытая хромом. Скорость вращения 10 об/с.

Торцевые биения поверхности пластины на радиусе записи около 40 мм составили около ± 5 мкм (что соответствует диапазону ± 3000 отн. ед. на рис. 9).

Для иллюстрации эффективности работы предлагаемого регулятора сигналы ошибки в увеличенном масштабе приведены на рис. 10.

Из рис. 9 и 10 видно, что система АФ с обычным регулятором позволяет подавить расфокусировку, обусловленную торцевыми биениями вращающейся подложки, примерно в 6–7 раз при скорости вращения 10 об/с до величины ± 1 мкм. При всех остальных равных условиях включение адаптивного регулятора обеспечило подавление расфокусировки более чем в 30 раз (см. рис. 10) до величины менее $\pm 0,1 - 0,2$ мкм. Кроме того, из рисунка видно, что сигнал ошибки с включенным адаптивным регулятором представля-

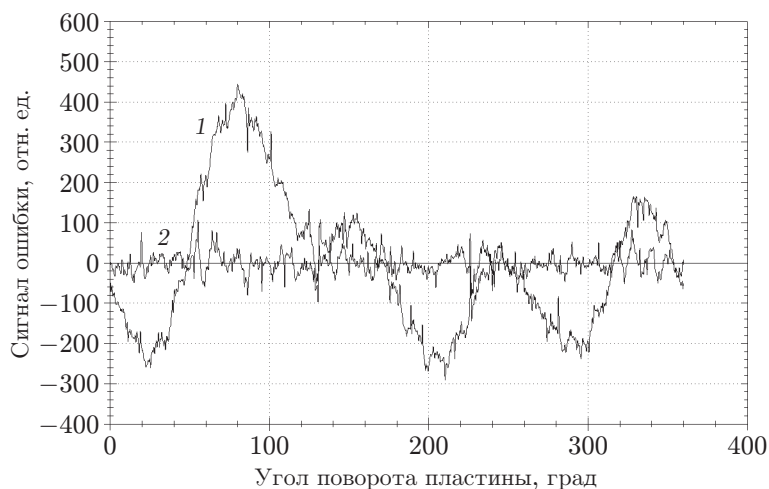


Рис. 10. Сигналы ошибки, полученные с обычным (кривая 1) и адаптивным (2) ПИД-регуляторами

ет собой шум, обусловленный, по-видимому, неравномерностью коэффициента отражения от поверхности вращающейся пластины. Применение адаптивного регулятора позволило обеспечить величину расфокусировки, достаточную для записи как бинарной, так и полутоновой информации.

Заключение. Представленный в данной работе регулятор позволяет получить больший коэффициент петлевого усиления по сравнению с обычным ПИД-регулятором. Это становится возможным даже при неточной настройке предложенного ПИД-регулятора, поскольку коэффициент петлевого усиления зависит от числа проходов по одному и тому же участку пластины. Достоинство регулятора состоит также в том, что процессы обучения и регулирования протекают параллельно.

Практическая реализация данного типа регулятора возможна при замене алгоритма работы (программное обеспечение) существующих цифровых ПИД-регуляторов. При наличии канала синхронизации и достаточного количества памяти не требуется внесения аппаратных изменений в уже существующий контроллер. Используя формулы (4)–(6), можно определить необходимые параметры регулятора.

Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН за помощь в разработке системы АФ и проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Полещук А. Г., Коронкевич В. П.** Лазерные методы трехмерного микроструктурирования оптических поверхностей // 3D лазерные информационные технологии /Под. ред П. Е. Твердохлеба. Новосибирск: ЗАО НПП «Офсет», 2003. Гл. 5. С. 243–310.
2. **Боухьюз Г., Браат Д., Хейсер А. и др.** Оптические дисковые системы: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991. 280 с.
3. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Appl. Opt.* 1999. **38**, N 8. P. 1295–1301.
4. **Poleshchuk A. G., Korolkov V. P.** Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements // *Proc. SPIE.* 2007. **6732**. P. 67320X.
5. **Кокоулин Ф. И., Полещук А. Г.** Исполнительные элементы автоматической фокусировки // *Опт.-мех. пром-сть.* 1979. № 8. С. 21–24.
6. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. и др.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // *Автометрия.* 2002. **38**, № 3. С. 3–19.
7. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // *Письма в ЖТФ.* 1985. **11**, № 3. С. 144–148.
8. **Полещук А. Г.** Погрешности формирования дифракционных структур лазерным термохимическим методом записи // *Автометрия.* 2003. **39**, № 6. С. 39–45.
9. **Лукас В. А.** Теория автоматического управления. М.: Недра, 1990. 416 с.
10. **Yen G. G.** Precision tracking control in flexible pointing structures // *Proc. SPIE.* 1996. **2760**. P. 273–283.
11. **Ogata K.** *Discrete-Time Control Systems.* Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1995.
12. **Yücelen T., Kaymakçi Ö., Kurtulan S.** Digital PID controller design with PLC for an industrial thermal system // 3rd Automation Symposium. Denizli, Turkey, 2005.
13. **Wang L., Barnes T. J. D., Cluett W. R.** New frequency-domain design method for PID controllers // *IEE Proc. D.* 1995. **142**, N 4. P. 265–271.

-
14. **Zhuang M., Atherton D. P.** Automatic tuning of optimum PID controllers // IEE Proc. D. 1993. **140**, N 3. P. 216–224.
 15. **Schei T. S.** A method for closed loop automatic tuning of PID controllers // Automatica. 1992. **28**, N 3. P. 587–591.
 16. **Oppenheim A. V., Schafer R. W., Buck J. R.** Discrete-Time Signal Processing. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 2003.
 17. **Pruss C., Korolkov V., Schoder T. et al.** Fabrication of high resolution diffractive elements by direct laser writing // http://www.uni-stuttgart.de/ito/Institut/Publikationen/Jahresbericht_03_04/ITO-05_research_ide.pdf

Поступила в редакцию 13 апреля 2009 г.
