УДК (621.3.085.42 + 681.7.064.4): 681.786.3 + 53.087.92

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СИНТЕЗА УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ (Аналитический обзор)

© 2007 г. **В. П. Кирьянов***, доктор техн. наук; **А. В. Кирьянов***; **Д. Ю. Кручинин****, канд. техн. наук; **О. Б. Яковлев****, канд. хим. наук

* Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск

** ПО “Уральский оптико-механический завод им. Э.С. Яламова”, г. Екатеринбург

E-mail: kiryanov@tdisie.nsc.ru, alexey@tdisie.nsc.ru

Проанализированы основные методы изготовления высокоточных (погрешность преобразования менее ± 3″) углоизмерительных структур (растров, шкал, лимбов, многоразрядных кодовых дисков) с позиций их применимости для создания высокоточных углоизмерительных приборов (УИП). По единой методике на одной измерительной установке в течение короткого интервала времени измерена накопленная погрешность растров, изготовленных по четырем альтернативным технологиям. Показано, что при производстве высокоточных УИП предпочтительнее использовать технологии, основанные на применении лазерных генераторов изображений.

Коды OCIS: 110.5220.

Поступила в редакцию 28.05.2007.

Введение

Наибольший вклад в общий баланс погрешностей углоизмерительных приборов (УИП) вносят погрешности изготовления основных входящих в них метрологических элементов: оптических лимбов, круговых шкал, растров, многоразрядных кодовых дисков, которые далее будем называть углоизмерительными структурами (УИС) [1, 2]. Как правило, в условиях промышленного производства процесс изготовления УИС состоит из двух стадий: изготовления эталонного образца УИС и последующего тиражирования этого образца с целью получения рабочих копий. Известно, что погрешности, внесенные на этапе изготовления эталонного образца, на последующих этапах не корректируются, более того, последующие этапы только снижают точность изделий. Поэтому создание как можно более точных эталонных образцов является необходимым компонентом технологического процесса изготовления высокоточных УИП.

Технологические процессы, наиболее часто применяемые в настоящее время для изготовления УИС, можно разделить на три группы: делительно-граверные, фототехнологические и лазерные (рис. 1).

Технологические процессы производства УИС на основе делительно-граверных машин имеют наи-

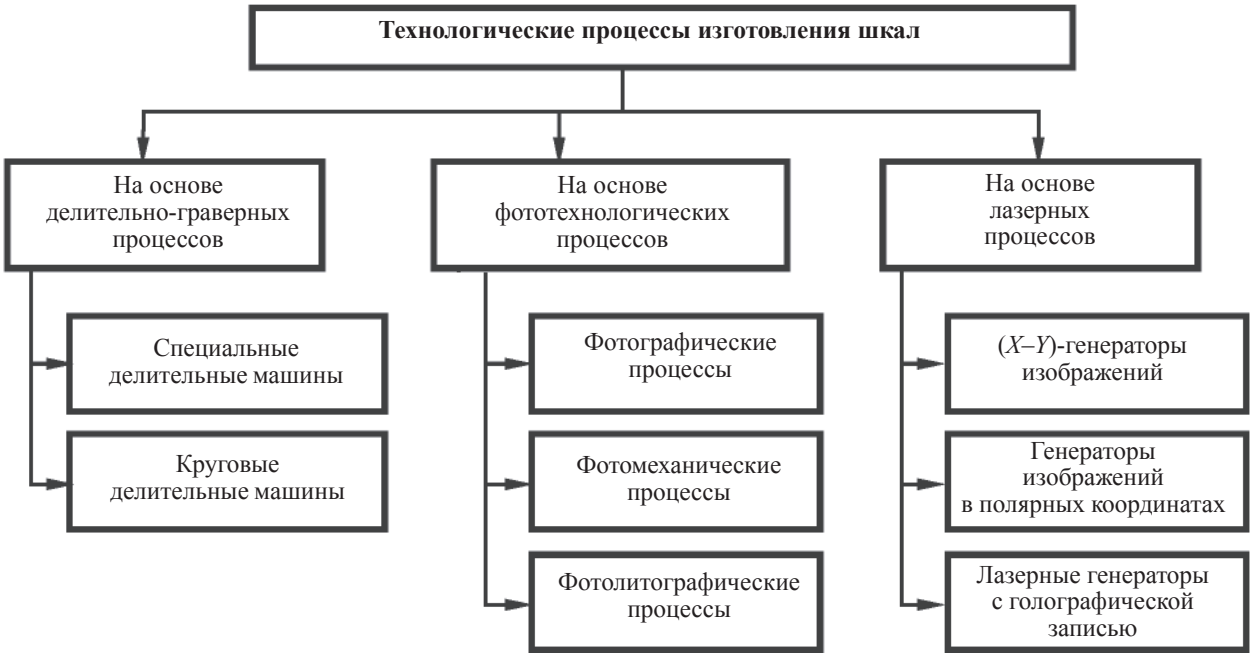


Рис. 1. Технологические процессы, применяемые в настоящее время для изготовления УИС.

более богатую историю, насчитывающую более сотни лет. Известно, что этот процесс характеризуется достаточно высокой стоимостью и низкой производительностью (например, требуется несколько недель для изготовления многоразрядного кодового диска или прецизионного растра с количеством штрихов более 8000). Более того, при увеличении времени изготовления лимбов к концу цикла изготовления отмечалось снижение качества резцов, приводящее к заметному увеличению результирующей погрешности изделия. Эти особенности стали резко тормозить процесс широкого внедрения фотоэлектрических угловых преобразователей в различные отрасли промышленности.

По этой причине с середины прошлого столетия стали быстро развиваться более производительные технологии на основе фотопроцессов. К середине 80-х гг. безусловным мировым лидером стала технология проекционной фотолитографии, созданная немецкой фирмой "Heidenhain", широко известная под названием "технология Diadur". Многие фирмы во всем мире ставили перед собой задачу освоения данной технологии. Только в Европе, кроме фирмы-разработчика, эту технологию освоили "Carl Zeiss–Jena" (ГДР), "RSF" (Австрия), "Iskra" (Югославия). В СССР данную технологию разрабатывал Вильнюсский филиал ЭНИИМС'а – головное предприятие в Советском Союзе по выпуску угловых преобразователей. Кроме попыток ЭНИИМС'а повторить "Diadur-технологию", в СССР в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) и Московском институте электронной техники (МИЭТ) под руководством проф. Л.Н. Преснухина велись работы по созданию специализированных делительных машин на основе фототехнологических процессов. Однако никому из них не удалось достичь уровня фирмы "Heidenhain" как по точности синтеза УИС, так и по точности угловых преобразователей. К середине 90-х гг. все четче стала проявляться тенденция замедления роста точности угловых преобразователей. В основном он поддерживался за счет компенсации систематических погрешностей преобразователей, реализуемой с помощью соответствующих электронных блоков, благодаря быстрому развитию микроэлектроники.

В это же время во всем мире стали интенсивно разрабатывать технологии синтеза УИС на базе универсальных генераторов изображений (лазерных и электронно-лучевых).

В данной работе представлен обзор базовых технологий синтеза УИС, проведено сравнение точностных показателей большинства из них. Так как в технической литературе имеется крайне ограниченный объем информации о точности созданных технологических комплексов, то для оценки пригодности существующих базовых технологий для синтеза высокоточных УИС было предложено использовать единый критерий оценки точности различных технологических комплексов. Критерий учитывает как полученную угловую погрешность синтезированной структуры, так и ее радиальный размер. Для того чтобы можно было воспользоваться данным критерием, пришлось в течение короткого интервала времени по единой методике выполнить измерения угловых растров, изготовленных по нескольким альтернативным технологиям. Измерения были выполнены специалистами ОТК оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода (УОМЗ) на установке контроля лимбов (УКЛ), созданной на заводе.

1. Обзор базовых технологий, применяемых для производства высокоточных лимбов

1.1. Изготовление УИС на основе делительно-граверных процессов

В основе делительно-граверных процессов лежит метод нанесения штрихов режущим инструментом на поверхности заготовок или в защитных органических или металлических покрытиях с помощью делительных машин. Необходимые обозначения, например, оцифровку геодезических лимбов в этих процессах производят, как правило, на отдельных специализированных копировально-фрезерных станках (пантографах). Делительные машины для производства лимбов по функциональному назначению подразделяют на круговые и специальные [3]. Круговые делительные машины используются для создания лимбов и многоразрядных кодовых дисков, специальные – для нанесения кривых сложной формы и шкал с особым расположением штрихов. Наибольшее распространение в граверно-делительном производстве получили машины моделей TKF-100, TKF-500 и TKF-1000 (число в названии модели указывает максимальный диаметр заготовки). Высокая точность нанесения делений на машинах обеспечивается тщательным изготовлением их деталей и узлов. Так, фирма "Feinmess" выпускала машины модели TKF-500 в двух исполнениях: первое – для нанесения штрихов с погрешностью не хуже ± 1″ и второе – с погрешностью не хуже 0,6″. Погрешность машин модели TKF-1000 не должна превышать 1″ или 0,2″ в зависимости от исполнения. На рис. 2 приведен измеренный на установке УКЛ график погрешности геодезического лимба, изготовленного на УОМЗ на машине модели TKF-100, со следующими параметрами: количество штрихов 360, средний радиус записи $R_{ср} = 45{,}2$ мм.

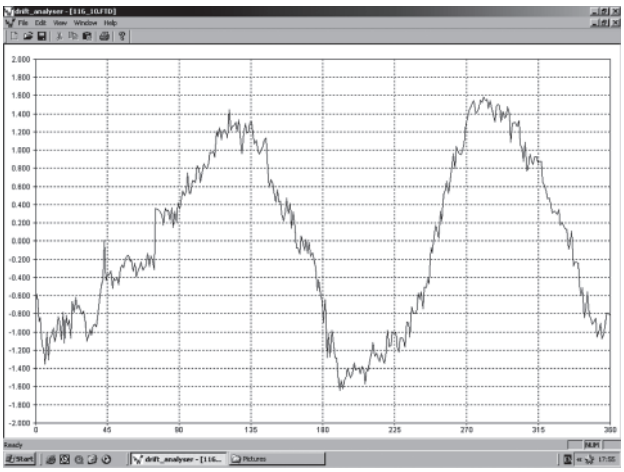


Рис. 2. Угловая погрешность геодезического лимба, созданного на машине модели TKF-100 (УОМЗ).

Из приведенного графика видно, что для растра, изготовленного по данной технологии, накопленное значение погрешности достигает ±1,6″.

1.2. Изготовление УИС на основе фототехнологических процессов

Фототехнологические процессы изготовления шкал и лимбов подразделяются на фотографические, фотомеханические и фотолитографические [1].

1.2.1. Технологии на основе фотографических процессов

При этом способе предварительно изготавливают увеличенный чертеж маски. Затем путем фотографирования получают негативы, размеры которых соответствуют требуемым размерам кодирующего диска. Негатив подвергают фототехнической обработке. В настоящее время этот метод практически не используется из-за сложности изготовления чертежа и большой угловой погрешности получаемых образцов. Так, погрешность, равная 10′, была наиболее типичной угловой погрешностью кодовых дисков, изготовленных по данной технологии. Минимальная достигнутая погрешность не снижалась ниже уровня 5′.

1.2.2. Технологии на основе фотомеханических процессов

Фотомеханические процессы основаны на экспонировании градаций УИС световым лучом в светочувствительной эмульсии и осуществляются с помощью высокоточных делительных устройств. Как правило, данные технологии были разработаны для производства многоразрядных кодовых дисков. При фотомеханическом способе подачу поворотного стола с заготовкой со светочувствительным слоем можно осуществлять как дискретно, так и непрерывно. Были созданы две разновидности фотомеханического способа изготовления кодовых дисков: секториальный (однооборотный) и поразрядный (многооборотный).

В настоящее время секториальный фотомеханический способ изготовления кодовых дисков практически не находит применения.

Поразрядный фотомеханический способ изготовления кодовых дисков лег в основу разработок автоматических специальных делительных машин (АСДМ), созданных в ЛИТМО. АСДМ выпускались в нескольких модификациях в зависимости от специфики работы машины. К сожалению, авторам не удалось договориться с разработчиками данных машин и получить для анализа образцы кодовых дисков, изготовленных с помощью данных установок.

В середине 70-х гг. прошлого века в МИЭТ была создана автоматизированная фотомеханическая делительная машина (АФДМ), которая позволяла создавать не только фотошаблоны кодовых масок, но и регулярные растры. В состав АФДМ, работающей под управлением ЭВМ, входят система экспонирования, цифровой позиционный датчик обратной связи угол–код, установленный соосно с приводом вращения и предметным столом. На предметном столе крепится фотозаготовка. В процессе непрерывного вращения фотозаготовки ЭВМ расчитывает угловые координаты фотовспышек, анализирует коды датчика угол–код и в случае равенства этих кодов вырабатывает команду на запуск через импульсный усилитель системы экспонирования. Таким образом, полное экспонирование круговой дорожки лимба в большинстве случаев происходит за один оборот предметного стола.

В 80-х гг. прошлого века данная технология была внедрена на Белорусском оптико-механическом объединении (БелОМО), где с ее помощью выпускались фотоэлектрические угловые преобразователи “Секунда-1” и “Секунда-2”. Однако в настоящее время эта технология на заводе полностью утрачена и получить для анализа образцы кодовых дисков также не удалось.

1.2.3. Технологии на основе фотолитографических процессов

Фотолитографические процессы обеспечивают получение изображения шкал и лимбов методами травления или нанесения слоя пленкообразующего

вещества по защитным рельефным маскам, образованным на поверхности заготовок из слоя высокомолекулярного светочувствительного соединения (фоторезиста) путем его экспонирования и последующего проявления рельефного изображения.

К 90-м годам прошлого столетия в мире при производстве высокоточных углоизмерительных устройств наибольшее распространение получила технология проекционной фотолитографии немецкой фирмы “Heidenhain” [4]. Отличительная особенность данной технологии состоит в том, что результирующая структура формируется путем многократного “впечатывания” в фоточувствительный слой фотошаблона изображения заранее подготовленного фрагмента, причем “впечатывание” фрагмента производят каждый раз со сдвигом на период структуры, сформированной на данном фрагменте. При соответствующем выборе экспозиции каждый элемент синтезированной структуры будет сформирован за n экспозиций, где n – число периодов структуры на подготовленном фрагменте. Время синтеза структуры равно $N\tau$, где N – число штрихов в синтезированной структуре, τ – время позиционирования и экспозиции на каждом периоде синтезируемой структуры. В каждом элементе синтезированной шкалы случайные отклонения положения штрихов исходного фрагмента будут ослаблены в $\sqrt{n}$ раз. Данная особенность технологии трактуется как эффект пространственного усреднения погрешностей исходного фрагмента, который позволяет повысить точность синтезируемых структур. Однако данный эффект не может подавить влияние систематических погрешностей и медленных дрейфов, что особенно существенно для данной технологии, так как время синтеза структур довольно значительно. Так, по данным работы [5], время синтеза растра с $N = 36\,000$ может достигать 10 ч. На рис. 3 приведен полученный на установке УКЛ график погрешности лимба преобразователя ROD-800 фирмы “Heidenhain” со следующими параметрами: количество штрихов 36 000, средний радиус записи $R_{ср} = 56$ мм. Из приведенного графика видно, что для растра, изготовленного по технологии Diadur, накопленное значение погрешности достигает $\pm 1{,}4''$. Кроме того, была зарегистрирована специфическая для Diadur-технологии погрешность в виде разрыва непрерывности на стыке начала и конца шкалы, достигающая $2{,}2''$. Кроме указанного недостатка, для данной технологии следует отметить также сложность синтеза многоразрядных кодовых дисков, нерегулярных структур и оцифровки геодезических лимбов. Используя данную технологию, фирма “Heidenhain” освоила выпуск широкой гаммы угловых преобразователей, среди которых наименьшую погрешность имеют преобразователи моделей RON-905 ($0{,}4''$ без коррекции и $0{,}2''$ с коррекцией, при использовании электронного блока AWE 1024) и ROD-800 ($0{,}8''$). Данные результаты фирма получила за счет применения в конструкциях фотоэлектрических угловых преобразователей считывающих головок с так называемыми индикаторными растрами, что позволило сгладить локальные погрешности сформированных лимбов. Поэтому на результирующих кривых погрешности угловых датчиков, как правило, не наблюдается выбросов, подобных выбросу на рис. 3. Более того, применяемый в угловых преобразователях метод многоотсчетной регистрации данных (или, как его еще называют, метод путевого усреднения [6]) позволяет значительно снизить результирующую погрешность прибора по сравнению с погрешностью используемого растра.

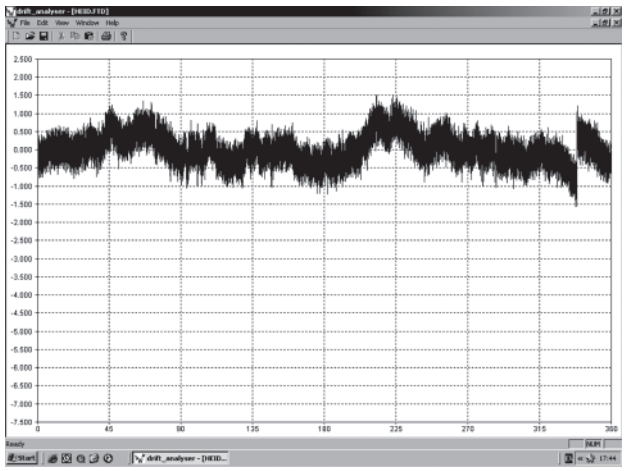


Рис. 3. Угловая погрешность лимба датчика ROD-800.

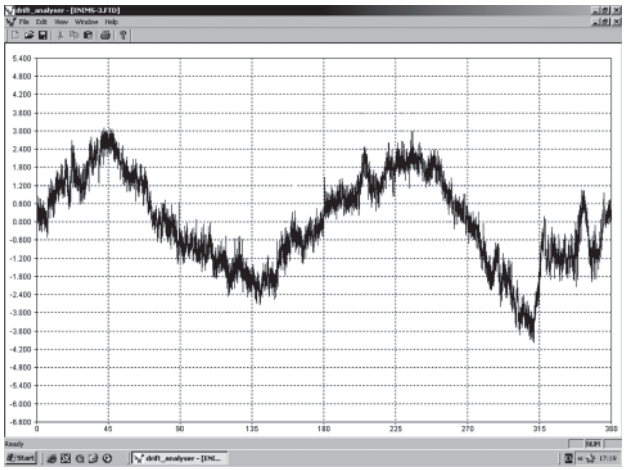


Рис. 4. Угловая погрешность лимба производства ЭНИИМС.

В СССР подобную технологию освоил (хотя и не смог довести ее до мирового уровня) Вильнюсский филиал ЭНИИМС (сейчас это американо-литовская компания “Brown@Sharp-Precizika”). На рис. 4 приведена полученная также на установке

Таблица 1. Технологические возможности изготовления УИС фирмой “Brown@Sharp–Precizika”

Параметр	Угловые шкалы (лимбы)
Максимальный диаметр лимба, мм	400
Минимальный период штрихов, мкм	10
Минимальная ширина штриха, мкм	5
Максимальная высота штриха, мм	20
Число штрихов на лимбе	от 2 до 80 000
Угловая погрешность, угл. с	
для лимба диаметром 200 мм	2
для лимба диаметром 20 мм	15

УКЛ кривая погрешности лимба, изготовленного данным предприятием в 1987 г. (количество штрихов 18 000, $R_{ср}$ = 53 мм), когда в СССР велись работы по созданию углового преобразователя – аналога преобразователя ROD-800 фирмы “Heidenhain”, с целью решения вопроса импортозамещения в этой сфере. Из приведенного графика видно, что накопленная погрешность растра составляет ± 3,3″, что почти в три раза хуже, чем у фирмы “Heidenhain”. При этом так же, как и у фирмы-разработчика технологии, имеет место разрыв непрерывности кривой погрешности в точках начала и конца шкалы, достигающий 3″.

В настоящее время фирма обладает технологией, позволяющей ей выпускать растры, параметры которых представлены в табл. 1.

Самый точный угловой преобразователь этой фирмы – это преобразователь модели A170, по габаритным, присоединительным и электрическим параметрам являющийся аналогом преобразователя ROD-800 (“Heidenhain”). Однако его результирующая погрешность равна 2,5″, что почти в три раза хуже, чем у прототипа.

1.3. Изготовление УИС на основе лазерных процессов

Технологии, использующие лазерные процессы для изготовления УИС, отличаются от граверноделительных и фототехнологических технологий прежде всего источником воздействия на материалы и покрытия. Современные высокоинтенсивные источники когерентного излучения – лазеры, входят в состав так называемых лазерных генераторов изображений, работающих либо в декартовой (X–Y), либо в полярной системе координат. К лазерным методам синтеза УИС относятся также технологии, использующие голографические методы записи структур.

1.3.1. Технологии записи УИС на основе лазерных (X–Y)-генераторов изображений

В России данную технологию использует Санкт-Петербургский филиал УОМЗ – “Урал–ГОИ”. В своей работе его специалисты применяют многолучевой лазерный генератор изображений ЭМ589 (разработка КБТМ, г. Минск). Запись структур производится по фоторезисту с последующим травлением хрома. Для определения погрешности растров, создаваемых на этой установке, была записана регулярная структура со следующими параметрами: $R_{ср}$ = 27,4 мм, количество штрихов 4096. Результат измерения погрешности данного растра на установке УКЛ приведен на рис. 5. Из приведенного графика видно, что погрешность синтеза УИС на данном генераторе достигает ± 6″.

Надо отметить, что результат синтеза кругового растра, полученный специалистами “Урал–ГОИ” на установке ЭМ589, является достаточно типичным для установок данного типа. Даже признанный лидер в этой области – японская фирма “Tamagawa Seiki Co” на начальной стадии процесса синтеза аналогичных структур имела близкий результат: ± 3,3″ [7]. Используя довольно сложный алгоритм обработки данных, включающий решение системы из 16 уравнений, проводится коррекция закона движения записывающей головки, в результате которой выполняется запись растра диаметром 150 мм, погрешность которого не превышает ± 0,3″. На базе этого растра фирма создала уникальный 30-битный угловой преобразователь абсолютного типа, имеющий погрешность, не превышающую ± 0,2″ (рис. 6).

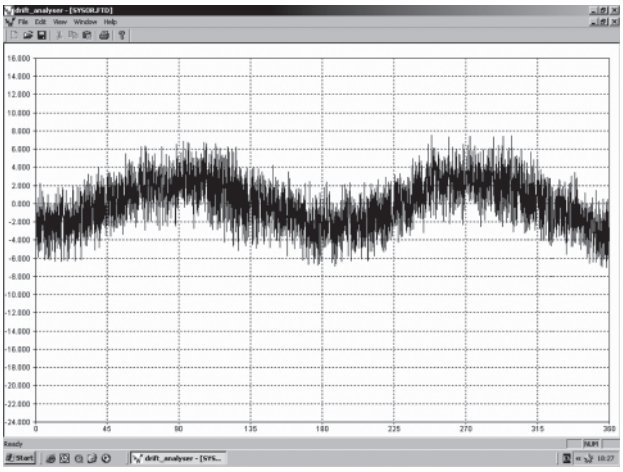


Рис. 5. Угловая погрешность лимба производства “Урал–ГОИ”.

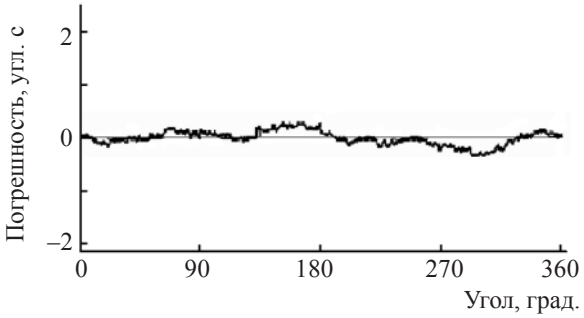


Рис. 6. Угловая погрешность 30-разрядного абсолютного преобразователя фирмы "Tamagawa Seiki Co".

1.3.2. Синтез УИС на основе технологий растрового сканирования

Этот метод был разработан в Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО АН СССР в начале 80-х гг. прошлого века. Суть этого метода заключается в следующем. Заготовка шкалы с нанесенным фоточувствительным слоем размещается на поворотном столе шпинделя, который переводится в режим непрерывного вращения. Топология элемента формируется в этом слое с помощью двух механических движений (быстрого вращения заготовки и медленного смещения луча лазера в радиальном направлении) и быстрого управления с помощью модулятора мощностью лазерного излучения, подводимого к фоточувствительному слою. Движение в радиальном направлении может производиться либо в пошаговом режиме, либо по спирали. Время записи структур не зависит от их сложности и определяется ее радиальным размером и выбранной скоростью движения каретки в радиальном направлении. Например, время записи радиального растра с 36 000 штрихов, аналогичного растру для преобразователей ROD-800 и RON-905, не превышает 2 ч. Данная технология не требует создания фрагмента будущей шкалы в виде стеклянного фотошаблона. Изображение будущей структуры подготавливается в управляющем компьютере с помощью стандартных графических пакетов типа AutoCAD и хранится в памяти компьютера. Новая технология позволяет за один технологический цикл и нанести прецизионную угловую шкалу, и оцифровать (при необходимости) штрихи данной шкалы, используя любой доступный шрифт, и нанести любую служебную информацию [8].

Одним из первых среди производителей угловых преобразователей, кто начал широко использовать метод растрового сканирования для синтеза УИС, было Специальное конструкторское бюро измерительных систем (СКБ ИС, Санкт-Петербург). На рис. 7 представлен график погрешности лимба, используемого в угловом преобразователе модели ЛИР-190. Этот лимб имеет следующие параметры: количество штрихов 6000, $R_{ср}$ = 33 мм. Из приведенного графика видно, что накопленное значение погрешности данного растра достигает ± 2,6″.

С 2001 г. установку CLWS-300/C, реализующую принцип растрового сканирования, стал использовать УОМЗ для производства широкой номенклатуры УИС, различных номограмм, сеток и другой продукции. Угловая погрешность установки CLWS-300/C была определена во время приемосдаточных испытаний путем записи партии однотипных УИС типа геодезического лимба. Эти лимбы имели следующие параметры: количество штрихов 360, средний радиус записи $R_{ср}$ = 45,225 мм. Результат измерений, полученный также с помощью установки УКЛ, приведен на рис. 8. Из этого графика следует, что погрешность синтеза УИС с помощью CLWS-300/C (УОМЗ) не превышает ± 1,0″ [9].

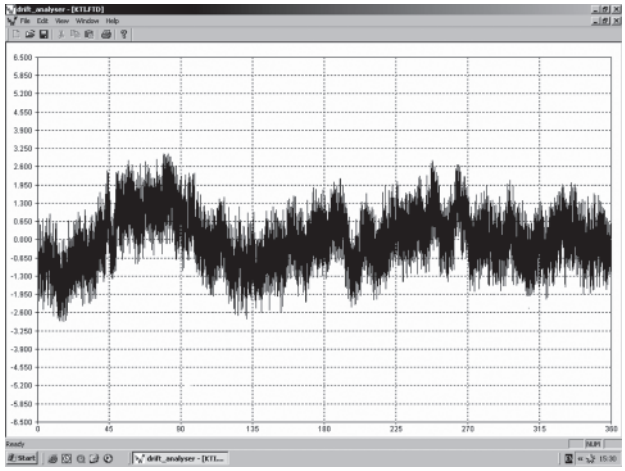


Рис. 7. Угловая погрешность лимба производства СКБ ИС.

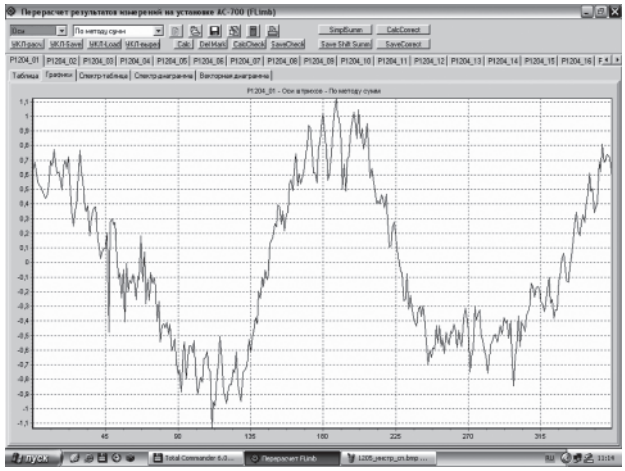


Рис. 8. Угловая погрешность геодезического лимба, созданного на лазерном генераторе CLWS-300/C (УОМЗ).

В настоящее время технология растрового сканирования стала усиленно развиваться в Японии. Корпорация “SONY” разработала специальную LBR (laser beam recording) машину. В ходе выполнения работ японскими исследователями был синтезирован растр диаметром 132 мм с числом штрихов 415 800. Результат измерения погрешности указанного растра приведен на рис. 9, из которого следует, что погрешность растра не превышает 0,6″ [10].

В 2007 г. в КТИ НП СО РАН была запущена модернизированная версия лазерного генератора модели CLWS-300. В ходе проведения испытаний по определению точностных показателей новой машины были записаны тестовые лимбы диаметром 85 мм с количеством штрихов $N = 6000$. На рис. 10 приведены результаты обмера тестовых лимбов на УКЛ. Они показали, что для растра, изготовленного по технологии растрового сканирования на модернизированном генераторе CLWS-300, накопленное значение погрешности не превышает ± 0,7″.

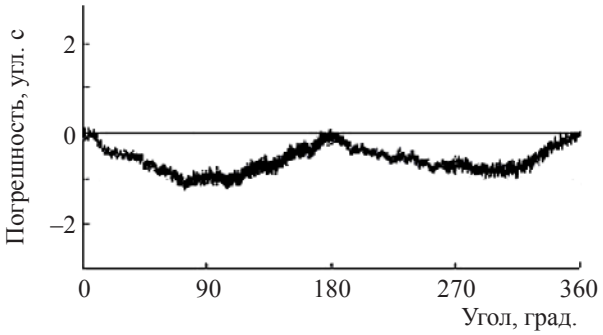


Рис. 9. График погрешности лимба фирмы “SONY” с количеством штрихов, равным 415800.

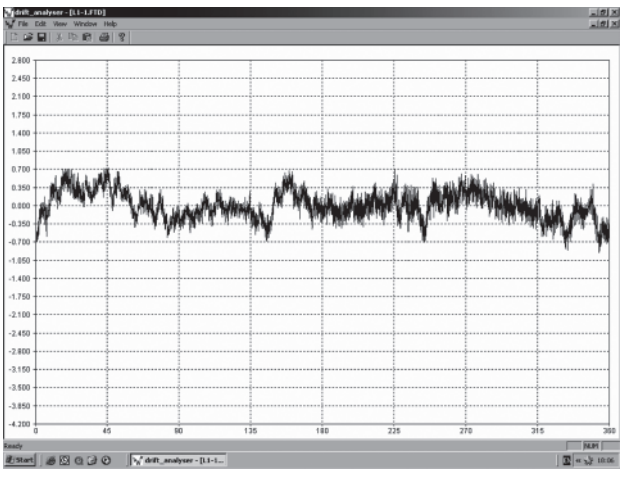


Рис. 10. Угловая погрешность лимба, созданного на модернизированной установке CLWS-300, производства КТИ НП.

1.3.3. Запись УИС на основе метода голографической записи

В 80-е гг. в СССР серьезные инвестиции со стороны государства были вложены в развитие уникальной технологии синтеза прецизионных угловых растров, предложенной профессором, доктором техн. наук Б.Г. Турухано и разработанной в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ). Технология позволяет синтезировать прецизионные растры с высоким пространственным разрешением для построения так называемых голографических угловых преобразователей. Радиальные голографические решетки изготавливаются на стеклянных подложках и представляют собой совокупность центрально-радиальных штрихов синусоидальной формы, расходящихся в виде лучей из одного центра, образующих периодическую структуру с высокой пространственной частотой. Решетки синтезируются бесконтактным способом с помощью голографического интерферометра. По характеру воздействия на световой поток они представляют собой пропускающие дифракционные решетки. Одним из главных узлов установки ПИЯФ для производства голографических лимбов является высокоточный аэростатический шпиндель. Шпиндель имеет встроенный угловой датчик и электродвигатель. Двигатель обеспечивает стабильное вращение шпиндельного узла в течение процесса записи. Весь процесс создания радиальной решетки длится 2 мин и выполняется автоматически под управлением компьютера. Компьютер используется также для коррекции погрешности углового датчика. По своей сути, данный процесс напоминает процесс впечатывания фрагмента будущей шкалы в фоточувствительный слой, характерный для технологии Diadur, с той разницей, что данный фрагмент здесь формируется в результате интерференции лазерных пучков. Однако, как и в случае с Diadur-технологией, данной технологии присущи следующие серьезные недостатки: не предусмотрена оцифровка шкал, невозможно изготавливать фотошаблоны нерегулярных шкал, в том числе специальных сеток, работающих в декартовых координатах, проблематично изготовление многоразрядных кодовых дисков.

В угловом датчике установки использован растр с высокой пространственной частотой следования штрихов (259 200 штрихов на оборот). Средний диаметр штрихов 160 мм, высота штрихов 10 мм. Растр выполнен на заготовке толщиной 10 мм с внешним диаметром 180 мм [11]. Этот датчик выполнен в ходе многоэтапного процесса.

На основе растров, синтезированных по данной технологии, в ПИЯФ был создан угловой преобразователь ПКГ-100. Технические характеристи-

Таблица 2. Основные технические характеристики углового преобразователя ПКГ-100

Диапазон измерений, угл. град	0–360, 0 ± 180
Число штрихов измерительной решетки	162 000
Число периодов синусоидального сигнала за 1 оборот вала	324E000
Дискретность отсчета, угл. с	0,01
Погрешность, угл. с (с коррекцией)	± 0,5(± 0,2)
Погрешность нуль-метки, угл. с	± 0,1
Частота вращения выходного вала без потери информации, об/мин	0–100

ки этого преобразователя представлены в табл. 2. К сожалению, авторам не удалось договориться с разработчиками данной технологии и получить для анализа образец голографического лимба, изготовленного с помощью этой технологии.

2. Сравнение базовых технологий синтеза УИС между собой

Сравнение между собой измерительных приборов по точности не представляет серьезной проблемы. Для этого используют различные показатели, например, относительную или абсолютную погрешность приборов. В случае УИП, для которых предел измерений чаще всего постоянный и равен 360°, нагляднее использовать абсолютные значения погрешности: доли либо градуса, либо угловой минуты, а для высокоточных приборов – доли угловой секунды. Однако то, что удобно для самих преобразователей, не всегда бывает удобно для технологического оборудования, с помощью которого изготавливаются главные узлы этих преобразователей – растры и лимбы. Уже давно замечено, что на одном и том же оборудовании лимбы малого диаметра всегда изготавливаются с большей погрешностью, чем лимбы большого диаметра. По этой причине все высокоточные угловые преобразователи имеют большой диаметр. Но как же тогда сравнивать между собой технологии, если на одном и том же оборудовании изготавливаются изделия различной точности? В [12] было предложено оценивать технологии синтеза УИС с помощью так называемого дестабилизирующего фактора F. Под этим параметром предложено понимать некоторую линейную величину, характеризующую нестабильность положения синтезируемой структуры относительно записывающего инструмента в пределах полного оборота. Для установок типа CLWS-300 этот фактор может вырождаться в тривиальное биение оси вращения шпинделя в плоскости подложки относительно оптического центра канала записи. Значение данного фактора для структур диаметром D несложно получить с помощью простого пересчета угловой погрешности растра $\Delta\varphi$

$$F = \frac{\pi D \times 10^3}{1\,296\,000}\Delta\varphi,$$

где D задано в миллиметрах, а $\Delta\varphi$ – в угловых секундах.

Результаты расчета дестабилизирующего фактора, характерного для анализируемых технологий, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета дестабилизирующего фактора, характерного для анализируемых технологий

№ п\п	Фирма-изготовитель, технология	Диаметр растра D, мм	Погрешность растра $\Delta\varphi$, угл. с	Дестабилизирующий фактор F, мкм
1	“Brown@Sharp–Precizika”, проекционная фотолитография	200 20	2,0 15,0	0,969 0,727
2	ЭНИИМС (1987), проекционная фотолитография	106	3,3	0,847
3	“Урал–ГОИ”, (X–Y)-генератор изображений	55	6	0,8
4	СКБ ИС, растровое сканирование	66	2,5	0,399
5	TKF-100 (Feinmess), УОМЗ	90	1,6	0,350
6	“Heidenhain”, Diadur-технология	110,7	1,1	0,293
7	CLWS-300 (2001, УОМЗ), растровое сканирование	90	1,0	0,218
8	“SONY” (2004), растровое сканирование	132	0,6	0,191
9	CLWS-300 (2007, КТИ НП), растровое сканирование	85	0,7	0,144
10	“Tamagawa Seiki Co.” (2004), (X–Y)-генератор изображений	150	0,3	0,109

3. Обсуждение результатов

Какие выводы из приведенной таблицы можно сделать? Бывшее головное предприятие Советского Союза по разработке и производству угловых преобразователей – Вильнюсский филиал ЭНИИМС, а сейчас Brown@Sharp–Precizika, за двадцать лет не смог серьезно повысить точность своей технологической установки и, как минимум, более чем в три раза не дотягивает до современных грандов в этой области, например, фирмы "Heidenhain" (Германия). Технологическая установка фирмы СКБ ИС имеет двухкратный запас по точности по сравнению с "Brown@Sharp–Precizika", что позволяет ей производить достаточно конкурентоспособную продукцию, однако все же заметно уступает фирме "Heidenhain". Делительные машины типа TKF-100 имеют неплохие показатели по точности, однако, как было указано во введении, им присущ существенный недостаток - увеличение накопленной погрешности при создании изделий с большим временем изготовления. Генераторы изображений CLWS-300 (УОМЗ) и фирмы "SONY" имеют небольшой запас по точности по сравнению с технологическим комплексом фирмы "Heidenhain". Еще более значительный запас по точности (по сравнению с немецкой фирмой) имеет установка CLWS-300 (КТИ НП). И, наконец, лидером, согласно данным этой таблицы, бесспорно, является фирма "Tamagawa Seiki Co" (Япония).

Довольно сложно делать какие-либо выводы относительно технологической установки создания голографических лимбов в ПИЯФ. С одной стороны, данной технологии присущ ряд ограничений, указанных ранее, с другой – параметры голографического углового преобразователя ПКГ-100 (погрешность ± 0,5″ без коррекции и ± 0,2″ при использовании электронного блока) сопоставимы с параметраими углового преобразователя RON-905 (погрешность ± 0,4″ без коррекции и ± 0,2″ при использовании электронного блока) фирмы "Heidenhain". Однако тот факт, что более чем за двадцать лет данная технология не только не получила широкого промышленного применения, но и на ее основе не было создано модельного ряда угловых преобразователей, по всей видимости, указывает на то, что она достаточно сложна и трудоемка. В настоящее время при проведении технического перевооружения предприятий стараются приобретать универсальное оборудование, способное выпускать широкую гамму продукции и позволяющее решать такие важные экономические задачи, как снижение себестоимости, минимизации издержек и др.

Сравнивая на представительном временном интервале динамику снижения угловой погрешности при формировании УИС, можно уверенно выделить технологические комплексы на основе лазерных генераторов изображений, работающих как в декартовой, так и в полярной системах координат. По достигнутым абсолютным показателям они отличаются между собой совсем незначительно, но именно они обеспечили к настоящему времени существенное повышение точности синтеза УИС. И можно прогнозировать, что дальнейший прогресс в снижении погрешности УИП будет обеспечиваться за счет их использования.

4. Заключение

Проанализированы базовые технологии синтеза углоизмерительных структур (круговых шкал, лимбов, растров, кодовых дисков), являющихся одними из важнейших узлов углоизмерительных приборов.

Отмечено, что наиболее старая технология (делительно-граверная) удерживает свои позиции по точности формирования ненасыщенных структур, но серьезно уступает современным технологиям по производительности и экономичности.

Самая прогрессивная во второй половине XX века технология проекционной литографии (Diadur-технология) в течение почти двух десятилетий практически не снижает достигнутой погрешности синтеза УИС.

Новые технологии, основанные на использовании лазерных генераторов изображений, показывают наибольшую динамику снижения погрешности синтеза УИС, что определяет перспективность их использования для создания нового поколения высокоточных углоизмерительных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Преснухин Л.Н., Майоров С.А., Меськин И.В., Шаньгин В.Ф.* Фотоэлектрические преобразователи информации / Под ред. Л.Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.
2. *Клисторин И.Ф., Кирьянов В.П., Кирьянов А.В.* Оценка потенциальной точности датчиков угловых перемещений с лимбами, изготовленными по способу кругового сканирования // Датчики и системы. 2006. № 1. С. 25–29.
3. *Федотов А.И.* Техногогия автоматизированного нанесения штрихов и знаков. Л.: Машиностроение, 1977. 304 с.
4. Angular encoders: General Catalog / Heidenhain GmbH. Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. 82 p.
5. *Шухард Г.* Новый приборный комплекс для изготовления высокоточных круговых шкал // Иенское обозрение. 1986. № 2. С. 92–94.

6. *Ионак В.Ф.* Приборы кинематического контроля. М.: Машиностроение, 1981. 129 с.

7. *Kojima T., Kikuchi Y., Seki S., Masuda T., Wakiwaka H.* Development of high-precise angle calibrating apparatus and high-precise angle sensor // Proc. of the 1st International Conference on Positioning Technology. [Tokyo: the Japan Society for Precision Engineering]. 2004. P. 417–422.

8. *Ведерников В.М., Кирьянов В.П., Корольков В.П., Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Седухин А.Г., Чурин Е.Г., Щербаченко А.М., Юрлов Ю.И.* Лазерная технология изготовления круговых шкал и кодовых дисков. Препринт № 319. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1986. 39 с.

9. *Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev C.A., Nikitin V.G., Bartik S.A., Frizin S.E., Kruchinin D.Yu., Yakovlev O.B.* Development of a technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesize of high precision angular measuring structures // Proc. of 10th IMEKO TC7 Intern. Symposium on Advances of Measurement Science. 2004. TC 7. V. 2. P. 316–320.

10. *Mukai N., Kono T., Suzuki A., Takagi K., Imanishi S., Furuki M., Tuchiya H.* High accuracy scale disk for rotary encoder // Proc. of the 1st Intern. Conf. on Positioning Technology. [Tokyo: the Japan Society for Precision Engineering]. 2004. P. 312–316.

11. *Gordeev S.V., Turukhano B.G.* Investigation of the interference field of two spherical waves for holographic recording of precision radial diffraction gratings // Optical & Laser Technology. 1996. V. 28. № 4. P. 255–261.

12. *Кирьянов В.П., Блинов А.В., Кирьянов А.В., Мокров Е.А., Трофимов А.А., Чугуй Ю.В.* Ключевые аспекты миниатюризации суперточных преобразователей угла поворота для ракето-космических комплексов // Труды ВНПК “ДиС-2006”. 2006. С. 106–116.