

Днепровский Е. В., ст. науч. сотрудник; Ероховец В. К., зав. лабораторией;
Ткаченко В. В., ст. науч. сотрудник ОИПИ НАН Беларуси

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМ ФОТОНАБОРОМ ДЛЯ ПЕЧАТИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ

The generalized structure and variants of functional circuits of a multicoordinate and multichannel control system of dot-matrix holography printer are considered. The choice and the estimation for quality parameters of control system are carried on conformity with requirements to process of manufacturing of protective holograms original-matrix.

Введение. Защитные свойства голограмм, получаемых по технологии dot-matrix, закладываются в процессе изготовления оригинал-матриц с помощью специальной лазерной фотонаборной установки — голографического принтера (ГП) [1–4]. Качество оригинал-матриц и временные затраты на их получение существенно зависят от эффективности системы управления ГП, в состав которого входят: оптический стол, He-Cd лазер, оптико-электромеханическая система, управляющий компьютер, пакеты базовых и прикладных графических программ для создания оригинальных картин-изображений, вводимых в голограмму, и программы формирования команд управления лазерным лучом и координатными приводами оптико-механической системы, использующей двухлучевую интерференцию для записи на слое фоторезиста (ФР) множества отражающих дифракционных решеток (ДР) малого размера (точек или пикселей) с различной пространственной частотой и ориентацией.

Требования к системам управления голографического принтера dot-matrix.

Упрощенная схема формирования интерференционной картины (ИК) в ГП dot-matrix приведена на рис. 1а. Массив ДР-пикселей образуется в результате перемещений подложки с ФР поперек оси оптической системы, включения лазерного луча в момент останова в заданных позициях и освещения ФР изображением интерференционных полос, образованных скре-

щенными когерентными пучками. Модуляция пучка осуществляется с помощью акустооптического модулятора (АОМ). Схема включает регулируемые элементы коллимирования и профилирования пучка. Расстояние между расщепленными коллимированными пучками автоматически устанавливается с помощью электроприводов, позиционирующих компоненты оптической системы, в соответствии с заданным значением периода ИК, а светоделительный узел имеет поворотный привод для изменения угла ориентации ДР в пределах пикселя. Схема с расщеплением лазерного пучка на ДР, перемещаемой вдоль оси вращения или автоматически меняемой на ДР с другим периодом для управления периодом ИК, приведена на рис. 1б.

Характерные числовые значения параметров системы dot-matrix для голограмм видимого спектра находятся в диапазонах:

- пространственная частота ДР, имеющих в каждом из отдельных пикселей произвольный азимут разворота, — 400–1000 штрихов на мм;
- формат кадра — 200–300 мм (максимальное количество пикселей вдоль каждой стороны кадра может составлять 10–20 тысяч);
- величина обратно пропорциональная расстоянию между пикселями (линиатура) — 400–1300 точек на дюйм (dpi) для расстояний 60–20 мкм, в пределе для высокоразрешающих моделей — до 5000 dpi и 5 мкм.

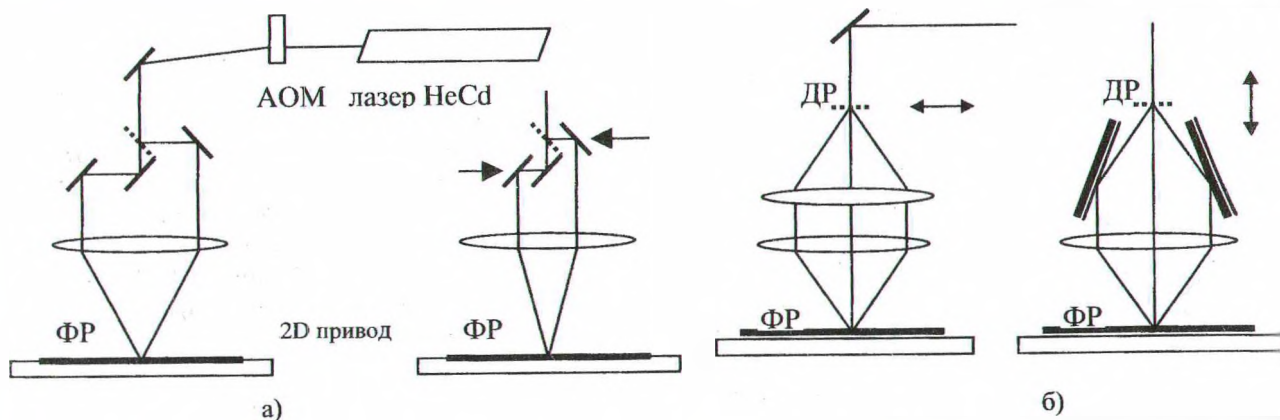


Рис. 1. Схемы формирования записывающего луча в ГП dot-matrix с помощью:
а — отражающих зеркал (призм); б — и дифракционной решетки

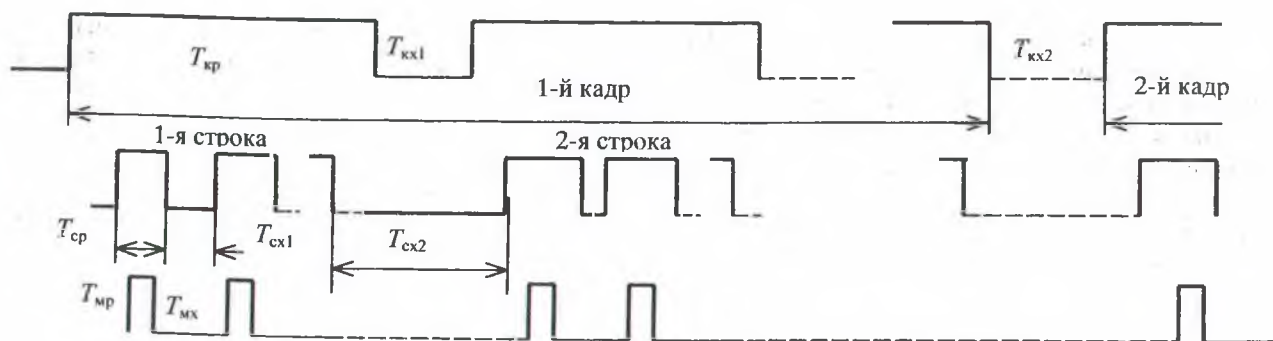


Рис. 2. Временные диаграммы многокоординатной развертывающей системы

Показатели качества системы управления ГП определяются требованиями плавного (с малым шагом) перемещения и точного позиционирования элементов оптической схемы и подложки ФР с целью сохранения высокой дифракционной эффективности ДР и заданной формы пикселей. Амплитуда колебаний пятна экспонирования не должна превышать 0,1 мкм, а точность совмещения изображения полос с поверхностью ФР — несколько микрон. Возможности разомкнутых систем программного управления на базе шаговых электроприводов с прецизионными направляющими отвечают требованиям к динамическому диапазону, но имеют недостаточное быстродействие, которое определяется временем завершения переходных процессов с установившейся ошибкой около 0,1 мкм. В системе управления ГП Sparkle [1] длительность импульсов записи — 1 мс, в то время как период следования — 60 мс. Повышение эффективности управления позволило бы существенно увеличить среднюю скорость записи и производительность ГП.

Оценка быстродействия многокоординатной системы управления растровой записью dot-matrix. Режим работы каждой из подсистем управления растровой разверткой и записью dot-matrix характеризуется последовательностью временных интервалов, в течение которых производится запись информации, и временных промежутков между ними, в которых происходит подготовка данной подсистемы к очередному циклу записи. На временной диаграмме (рис. 2) представлены последовательности рабочих и холостых интервалов для подсистемы кадровой развертки ($T_{кр}$, $T_{кх1}$, $T_{кх2}$), строочной развертки ($T_{ср}$, $T_{сх1}$, $T_{сх2}$) и модуляции ($T_{мр}$, $T_{мх}$). Предельная скорость записи определяется энергетическими характеристиками процесса экспонирования и выбранной парой "источник лазерного излучения — носитель записи".

Аналогичные последовательности имеют место и для более сложных систем, имеющих несколько уровней растривания: систем многострочной, микрорастровой или пофрагментной записи [5]. На каждом из уровней

могут быть использованы различные типы исполнительных элементов: шаговые моторы или двигатели постоянного тока с механизмами поступательных перемещений и вращения, пьезопроводы и гальванометры с оптическими элементами: зеркалами, призмами, диафрагмами — дефлекторы и модуляторы. Например, многоуровневая система может включать подсистемы с корректирующими дефлекторами (КД) для позиционирования лазерного пучка в пределах его поперечного сечения.

Производительность или быстродействие системы управления оценивается средней скоростью (частотой) записи пикселей. Например, время экспонирования оригинал-матрицы размером 200x200 мм при разрешении 500 dpi (20 точек на миллиметр) и длительности экспонирования одного пикселя 1 мс составит 4,5 часа, а с учетом времени переходных процессов запись оригинал-матрицы может превысить сотни часов и стать слишком дорогостоящей или невозможной. В условиях производства это заставляет ограничивать размер и разрешение голограмм, а при получении печатных форм применять мультипликацию изображений оригинал-матриц небольшого размера.

Сокращение времени на управление возможно только в пределах фундаментальных ограничений, с которыми согласованы оптимальные траектории развертки со старто-стопным характером, и допустимых амплитуд вибраций, создаваемых на форсированных режимах управления с участками "разгона" и "торможения".

Другой подход предполагает использование нониусных, или многоканальных, систем, включающих, согласно принципу инвариантности систем управления, каналы коррекции для организации дополнительного быстродействующего управления разверткой луча в малом диапазоне его углов отклонения, а также и датчики, позволяющие контролировать координаты и параметры луча в плоскости, сопряженной с поверхностью носителя записи. В качестве исполнительных элементов таких быстродействующих каналов могут быть использованы АОМ и электромеханические светоотклоняю-

щие устройства — дефлекторы светового пучка с отражающими (преломляющими) оптическими элементами [6], в том числе, многоэлементные микрозеркальные устройства, изготавливаемые по интегральным технологиям. Полоса частот с отклонением луча в пределах релеевского разрешения, которой оценивается быстродействие электромеханических дефлекторов, может составлять 1–100 кГц. При использовании их на пределе быстродействия, в резонансном режиме, скважность сигнала модуляции луча может быть уменьшена до 4 единиц и средняя скорость записи увеличена в 10 с лишним раз по сравнению с ГП Sparkle [1]. Полоса частот АОМ-дефлектора (АОМ-Д) ограничивается временем распространения акустической волны в сечении светового пучка и превышает 1 МГц. Численная оценка для АОМ-Д типа МЛ-201 и сопоставление с прототипом показывает, что с одновременным увеличением мощности лазерного луча время вывода оригинал-матриц можно сократить в сотни раз.

Возможности увеличения мощности лазерного пучка в импульсе связаны с использованием прямой модуляции луча по источникам накачки или питания лазерного генератора. Например, для твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой ЛТИ-507, ЛТИ-508 ультрафиолетового и видимого диапазонов излучений с импульсным режимом работы сред-

няя мощность излучения составляет 0,1 мВт и 2 мВт при мощности в импульсе 1 и 10 Вт. Запись короткими лазерными импульсами позволяет использовать режимы регистрации с постоянной скоростью, исключаяющей старто-стопное движение вдоль “быстрой” координаты. Преимущество такого режима реализуется при условии

$$P' > P(\tau/t_a)(a/\delta),$$

где P' — мощность в импульсе; P — мощность непрерывного излучения; τ — длительность импульса; t_a — период модуляции; a — расстояние между пикселями (a/t_a — скорость).

Обобщенная структурная схема системы управления ГП. Выбор той или иной структуры системы управления ГП целесообразно проводить вместе с выбором элементов сканирующей оптической системы. Чаще всего задачи управления пространственным положением луча и его модуляцией сразу рассматриваются раздельно в расчете на использование готовых решений [7]. Однако такой подход приводит не к лучшим техническим решениям, так как не учитывает всех особенностей процесса лазерной записи, связанных с тем, что отдельные параметры лазерного луча как подвижного локального воздействия являются взаимосвязанными, то есть мощность, размер пучка в зоне воздействия, координаты пространственного

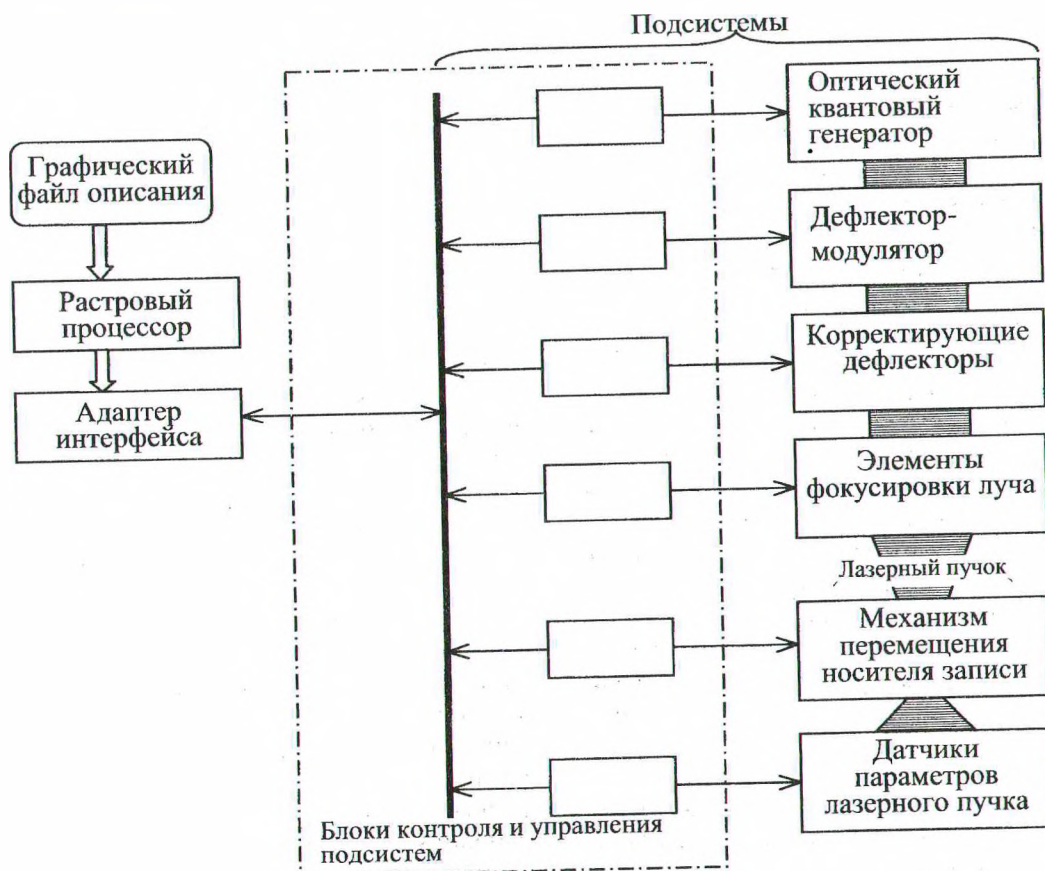


Рис. 3. Обобщенная структурная схема системы управления

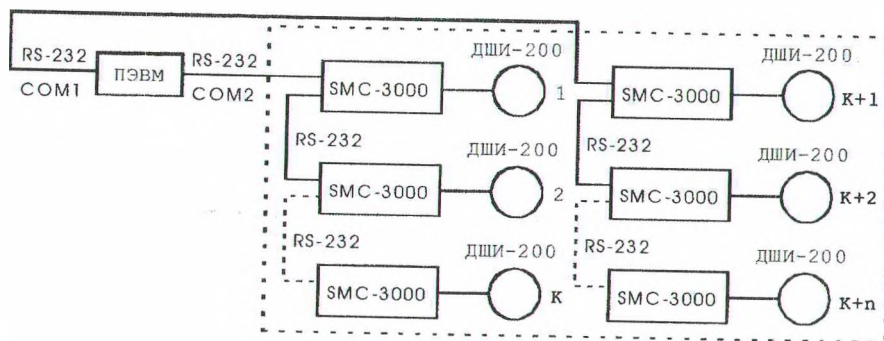


Рис. 4. Структурно-функциональная схема системы программного управления ГП

положения взаимосвязаны друг с другом компонентами оптической системы. Кроме того, и в том числе взаимосвязи обуславливаются тем, что контуры управления подсистем могут содержать индивидуальные или общие (для подсистем) датчики параметров луча, зависящие от тех или иных исполнительных элементов.

Принимая во внимание то, что лазерный луч практически безынерционен, систему управления ГП можно представить в виде отдельных подсистем управления его параметрами (рис. 3) и рассматривать в классе голономных автоматических систем, при проектировании которых учитываются не только те связи между подсистемами, которые обеспечивают передачу синхронизирующих сигналов, но и взаимосвязи подсистем по выходным регулируемым координатам и пространственно распределенным параметрам луча. Под голономной системой понимается система, движение (выходная функция) в которой задано с точностью до многообразия или пересечения многообразий в пространстве, размерность которого равна числу воспроизводящих систем. Функциональная связь между сигналами, поступающими на вход, известна и задается в параметрическом виде, а в роли аргумента выступает время. По аналогии с технологией полиграфического рас-

тирования для обозначения функции модулирующего воздействия системы dot-matrix можно использовать понятие "растровой функции". На практике она формируется программным способом, а входное воздействие как результат растривания представлено в виде графических файлов.

На рис. 4 приведена структурно-функциональная схема многокоординатной системы программного управления на базе подключаемых последовательно к COM-порту электронных модулей SMC-300, нагрузкой которых являются шаговые двигатели ДШИ-200. Расчетная оценка времени переходных процессов в старт-стопном режиме по известной величине ускорения, сообщаемого нагруженным приводом во время разгона и торможения на отрезке, равном размеру пикселя, показывает: при шаге 50 мкм (линиатура 500 dpi) время переходного процесса составит 3–5 мс, что в несколько раз превышает длительность экспонирования, но в десятки раз меньше времени позиционирования в ГП Sparkle. Рассчитанное значение не является пределом для системы в целом и может быть улучшено за счет:

- снижения инерционности нагрузки и оптимизация режимов и алгоритмов управления шагового двигателя с учетом ее динамики;

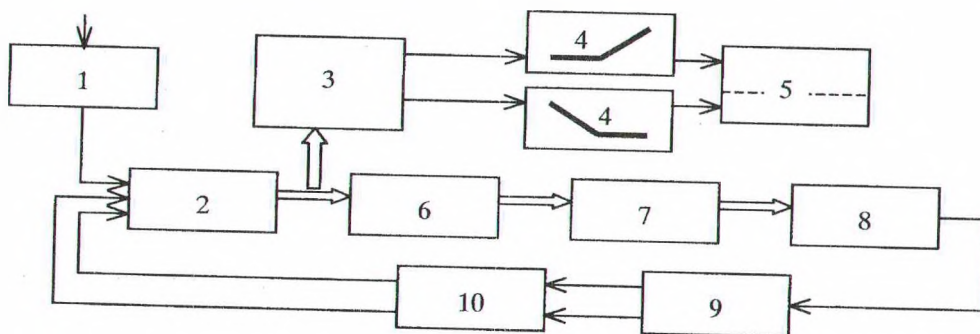


Рис. 5. Система управления позиционированием луча с корректирующим дефлектором: 1 — датчик длины шага; 2 — блок определения ошибки положения носителя; 3 — цифроаналоговый преобразователь; 4 — высоковольтный усилитель; 5 — пьезокерамический дефлектор; 6 — распределитель импульсов управления шагового двигателя; 7 — блок усилителей мощности; 8 — шаговый двигатель; 9 — интерферометрический датчик; 10 — формирователи квадратурных сигналов sin-cos

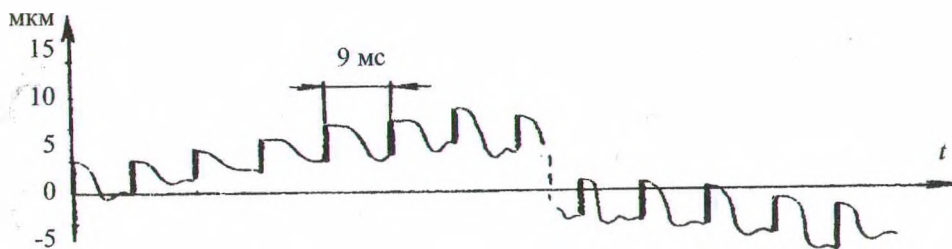


Рис. 6. Временная диаграмма сигнала ошибки позиционирования в разомкнутой системе на базе шагового двигателя ДШИ-200

— построения многоканальных систем с дополнительными быстродействующими элементами коррекции положения луча.

Система управления с пьезокерамическим корректирующим дефлектором (КД). Система двухканального управления разверткой по одной координате (рис. 5) обеспечивает формирование сигналов управления приводом подложки и КД, которые определяются в зависимости от ошибки положения каретки как разность между заданной командой на перемещение каретки и сигналов о ее истинном положении, поступающих от интерферометрического датчика (рис. 6).

Замыкание шагового привода обратной связью позволяет с точностью до 1 шага устранить циклические ошибки позиционирования. Возможность уменьшения этой погрешности до 1,5 мкм показало испытание пьезокерамического дефлектора в канале коррекции положения луча. При этом ошибка управления шаговым приводом не должна превышать 10 мкм, так как пьезокерамика имеет собственный гистерезис.

Уменьшение длительности переходных процессов в системе кадровой развертки при сохранении точности ее работы может быть достигнуто при согласовании шага адресации с шагом привода каретки, при замыкании привода КД обратными связями и при дроблении шага привода каретки. Применение для кор-

рекции корректирующего дефлектора позволяет обеспечить точность позиционирования строки порядка 1 мкм при частоте задания не менее 1 кГц.

Система управления с корректирующим АОМ-Д. На рис. 7 приведена структурная схема системы управления разверткой с линейными приводами для перемещения ФР по координатам X и Y и корректирующим дефлектором АОМ-Д для быстрого отклонения лазерного луча. В зависимости от того, последовательно или параллельно подаются на вход АОМ-Д спектральные составляющие сигнала возбуждения ультразвука, формируется либо микрорастр, либо веер пучков, отдельно модулируемых, но одновременно сканируемых в том же направлении. При этом акустооптическая ячейка ориентирована так, что разворачивает пучок вдоль направления X быстрой развертки. Подсистема управления разверткой по X-координате может работать как в режиме с замкнутой обратной связью по положению через прецизионный (фотоэлектрический) датчик, так и в разомкнутом. В первом случае в подсистеме коррекции позиции луча отрабатывается сигнал ошибки в основном канале X. При работе с разомкнутым контуром обратной связи и при известном значении скорости сканирования по X-координате подсистема коррекции отрабатывает сигнал пилообразной формы.

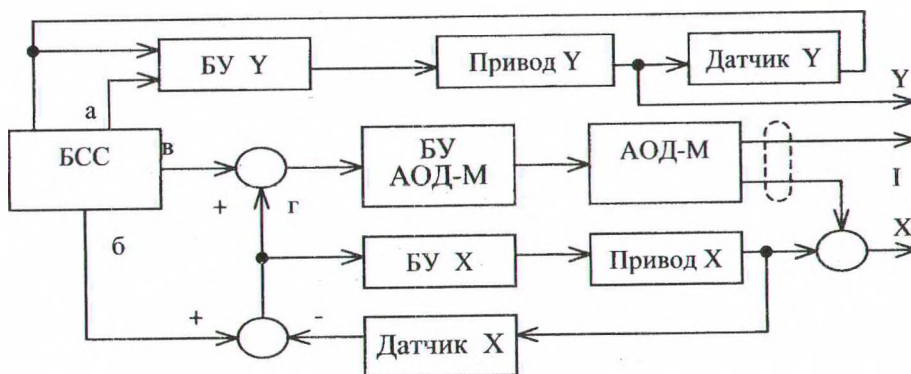


Рис. 7. Система управления записью с АОД-М:

БСС — блок сопряжения и синхронизации; БУ — блок управления;
а — синхронизация строчной развертки; б — синхронизация кадровой развертки; в — сигнал задания микрорастра; г — сигнал коррекции микрорастра

Заключение. Предложена обобщенная структурная схема (рис. 3) и рассмотрены варианты реализации системы управления голографического принтера с использованием многокоординатных модульных систем: разомкнутые по обратной связи на базе шагового электропривода прямого управления (рис. 4) и двухканальные (рис. 5 и 7). Показана возможность многократного повышения производительности по сравнению с аналогами с применением импульсных режимов записи и корректирующих дефлекторов.

Литература

1. J. T. Lee, John Hsu, C.K. Lee Dot Matrix Holograms // Holography MarketPlace, 7th ed.
2. S.L. Yen, Shyh T. Lin Dot Matrix with hidden image // Optical engineering, 41 (02), 2002. — P. 314–318.
3. Ying Tsuny Lu, Sion Chi Apparatus and method for making a security hologram with multi-

images in different viewing dirution in a small area // Proc. SPIE, vol. 3973. — P. 330–338.

4. Ероховец В. К. Аналоговый и цифровой синтез защитных голографических изображений // Методы и средства обработки сложной графической информации: Тез. докл. VII Всероссийской с участием стран СНГ конф., 15–18 сент. 2003 г. — Н. Новгород. — 2003. — С. 54.

5. Днепроvский Е. В., Ероховец В.К., Липень В. Ю., Ткаченко В. В. Системные закономерности формирования концептуальных моделей средств документирования // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информатика. — 2001. — Вып. IX. — С. 87–90.

6. Расчет элементов лазерных сканирующих систем. Методические рекомендации / Е. В. Днепроvский и др. — Минск: Ин-т. техн. кибернетики АН БССР, 1986. — 193 с.

7. Заведеев В. В. Модульный привод — современный метод успешной автоматизации // Автоматизация. — 2003. — № 1. — С. 19.