

Н. А. АФОННИКОВ, А. М. БУФАЦ, А. Ф. ДУНАЙЦЕВ, А. А. ИВАНОВ,
 А. АН. ИВАНОВ, П. И. КОРОБЧУК, Г. М. МАКСИМОВ, В. Я. МЕДВЕДЬ,
 А. Ф. МОРОЗОВ, Ю. С. НЕЧАЕВ, Т. Г. ЯКОВЛЕВА, В. Ю. ЯРОЦКИЙ

(Серпухов)

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. В последние годы интенсивное развитие получили лазерные устройства для вывода графической информации — лазерные генераторы изображений (ГИ) [1—3]. Использование лазерных источников излучения связано с их специфическими характеристиками: монохроматичностью излучения, малой угловой расходимостью, высокой плотностью энергии и, что особенно важно, возможностью высокочастотной модуляции излучения. В создаваемых лазерных ГИ используется преимущественно растровый принцип развертки, позволяющий реализовать высокие скорости вывода. К таким устройствам относится и описываемый в данной работе лазерный ГИ планшетного типа, разработанный в ИФВЭ.

При разработке лазерных ГИ, как правило, возникает проблема устранения нелинейности между показаниями отсчетной системы устройства и положением лазерного луча в плоскости фотоматериала. Обычно эта проблема решается путем конструирования устройства таким образом, чтобы величины нелинейности, вызванные дисперсиями оптических элементов, погрешностями изготовления механических узлов, неидеальностью сборки, юстировки и т. д., свести до приемлемого уровня. Такой подход приводит к существенному усложнению устройства и, что особенно нежелательно, к необходимости удовлетворить высоким требованиям при изготовлении его оптико-механической части.

Однако возможен альтернативный подход, при котором в устройстве реализуются более простые и технологичные решения, а величины нелинейностей определяются с помощью процедуры калибровки и учитываются в процессе вывода изображения, т. е. осуществляется коррекция выводимой информации. Причем процедуру калибровки можно выполнить с использованием тестового образца, измеряя его непосредственно на данном устройстве. В этом случае появляется возможность значительно упростить устройство, сделать его более надежным. Такой подход, реализованный ранее при создании лазерного графопроектиратора ИФВЭ на основе однозеркального дефлектора [4], был взят за основу и при разработке описываемого лазерного ГИ.

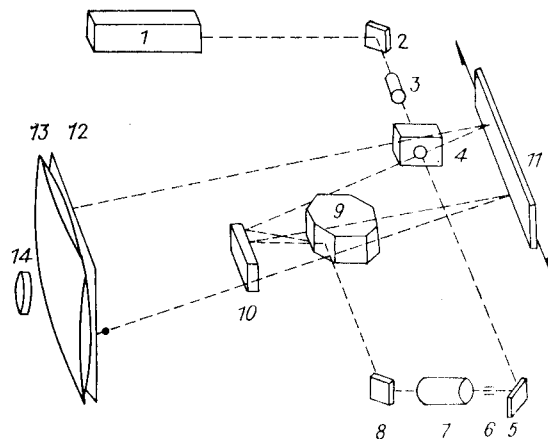
Устройство и принцип работы лазерного ГИ. В описываемом устройстве развертка лазерного луча по поверхности фотоматериала осуществляется: по строке (координата X) — вращающейся восьмигранной зеркальной призмой, по кадру (координата Y) — плоским зеркалом с магнитоэлектрическим приводом. Призма изготовлена из стекла с высокой точностью (например, пирамидальность, т. е. величина углового допуска плоскости каждой грани относительно оси вращения призмы составляет $\pm 0,5''$). Вал, на котором отъюстирована призма, установлен на аэродинамических подшипниках. Плоское зеркало дефлектора по Y -координате имеет подвес на основе точечных опор.

Размеры рабочего поля определяются длиной хода луча от поверхности отклоняющего элемента (граней призмы, зеркала кадрового дефлектора) до плоскости фотоматериала, а также величиной рабочих углов отклоняющих элементов ($\pm 3^\circ$) и могут варьироваться. Выбранная на данном этапе длина хода луча соответствует размерам рабочего поля 400×300 мм.

Оптическая схема ГИ приведена на рис. 1. В качестве технологического лазера используется аргоновый лазер, разработанный на Московском электроламповом заводе (одноименный, непрерывного действия,

Рис. 1. Оптическая схема лазерного ГИ:

1 — технологический лазер; 2, 5, 8, 10 — поворотные зеркала; 3 — афокальная насадка; 4 — акустооптический модулятор; 6 — входная апертура; 7 — оптическая трубка; 9 — зеркальная призма; 11 — зеркало кадрового дефлектора; 12 — фотоматериал; 13 — конденсор; 14 — ФЭУ



длина волны излучения 0,488 мкм, диаметр луча 1,3 мм, мощность излучения регулируется в пределах от 10 до 200 мВт). Луч технологического лазера 1 после поворота зеркалом 2 сжимается с помощью афокальной насадки 3 до размеров входного окна оптического затвора 4. В качестве оптического затвора используется акустооптический модулятор (АОМ) МЛ-201. Рабочий луч, отклоненный модулятором, поворачивается зеркалом 5 и после апертуры 6 расширяется с помощью оптической трубки 7. Поворотное зеркало 8 направляет расширенный луч на вращающуюся призму 9, которая обеспечивает его горизонтальную развертку каждой гранью. Развернутый луч с помощью поворотного зеркала 10 направляется на зеркало 11 кадрового дефлектора, обеспечивающего кадровую развертку луча на фотоматериале 12. Оптическая трубка 7 выполняет также функцию фокусирующего узла, обеспечивая фокусировку луча в плоскости фотоматериала. Диаметр пятна в настоящее время выбран равным минимально возможной ширине трасс на печатных платах, изготавливаемых в САПР ИФВЭ (400 мкм). При этом в силу малости рабочих углов отклоняющих элементов максимальное изменение диаметра пятна на рабочем поле составляет ~1%, а дефокусировки пятна практически не наблюдается.

Устройство позволяет также осуществлять режим считывания графической информации с прозрачного носителя (фотопленки, фотопластины). В этом случае в фокальной плоскости вместо фотоматериала располагается носитель графической информации, за которым устанавливаются конденсор 13 и ФЭУ 14. При пересечении лучом лазера элемента изображения на выходе ФЭУ появляется видеосигнал, который используется для иницирования съема данных о положении и размерах этого элемента с датчиков углового положения призмы и кадрового зеркала. Режим считывания используется при проведении калибровочной процедуры, результатом которой является получение величин коррекций, вносимых в выводимую информацию для компенсации искажений.

Использование малоинерционного кадрового отклоняющего блока позволило осуществлять коррекцию погрешностей, вызываемых пирамидальностью призмы. Величины соответствующих поправок по Y-координате для каждой грани вычисляются путем сравнения данных, полученных сканированием тестового образца отдельными гранями призмы.

Структурная схема ГИ. Общая структурная схема лазерного ГИ приведена на рис. 2. Развертка лазерного луча по поверхности фотоматериала осуществляется зеркальной призмой 11 и плоским зеркалом магнитоэлектрического дефлектора 10. Призма 11 приводится во вращение двигателем постоянного тока. Необходимая стабильность скорости вращения призмы обеспечивается системой стабилизации скорости вращения призмы 15. Угловое положение призмы и отклоняющего

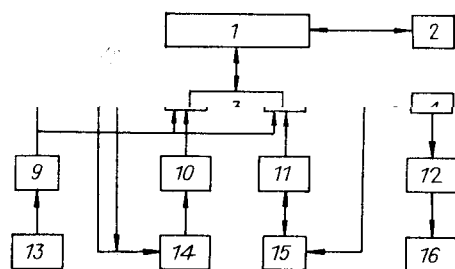


Рис. 2. Структурная схема лазер-
ной системы с каналом ГИ:
1 — лазер; 2 — привод АОМ; 13 — ФЭУ
трекового канала; 14 — система управ-
ления кадровым дефлектором;
15 — система стабилизации скоро-
сти вращения призмы; 16 — АОМ

зеркала дефлектора кодируется отсчетными системами 7 и 6 соответственно.

Отсчетная система 7 строчной развертки (координата X) выполнена с использованием опорной решетки, представляющей собой стеклянную пластину, на которой нанесены непрозрачные полосы шириной ~ 25 мкм, разделенные интервалами такой же ширины. Общее количество прозрачных и непрозрачных полос на решетке составляет ~ 2000 . В пределах одной полосы решетки производится линейная интерполяция, позволяющая увеличить точность кодирования в 16 раз. Таким образом, динамический диапазон по координате X составляет 2^{15} , т. е. единица отсчета $\sim 1/32000$ от длины строки (400 мм) и равна 12,5 мкм в плоскости фотоматериала. При вращении призмы луч гелий-неонового лазера ЛГН-203, используемого в измерительных каналах, разворачивается по опорной решетке.

Видеосигнал с ФЭУ, установленного за опорной решеткой, используется электроникой отсчетной системы для кодирования углового положения луча вдоль строки. Средняя частота тактовых импульсов, используемых в кодирующем устройстве положения пятна вдоль строки, составляет ~ 10 МГц. Система фазовой подстройки автоматически подстраивает их частоту в зависимости от скорости развертки луча, которая при постоянной угловой скорости вращения призмы изменяется вдоль строки вследствие плоскостности фотоматериала.

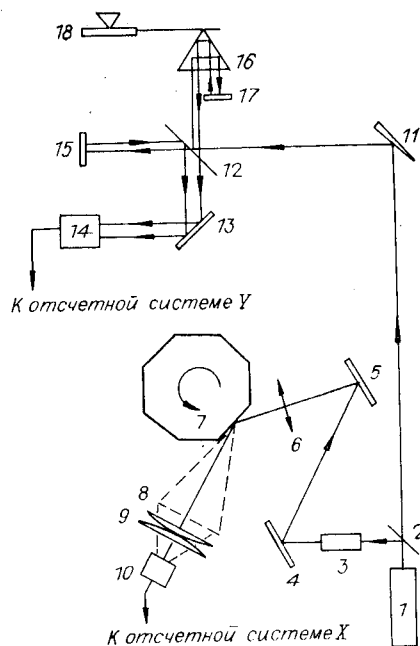
Использование опорной решетки позволило существенно снизить требования к стабильности скорости вращения призмы. Фактически требуется только обеспечить равномерность экспозиции фотоматериала вдоль строки, для чего вполне достаточно поддерживать постоянной угловую скорость вращения с точностью 1—2%. Информацией о текущей скорости вращения призмы для системы ее стабилизации 15 является частота повторения видеосигналов с ФЭУ канала с опорной решеткой. Управление скоростью вращения осуществляется изменением напряжения, подаваемого на двигатель, в соответствии с изменением частоты повторения видеосигналов.

Основой отсчетной системы 6 кадровой развертки (координата Y) является интерферометрический датчик углового положения, построенный по схеме Майкельсона в недифференциальном варианте. Принцип работы отсчетной системы Y -канала полностью соответствует принципу, описанному в [5]. Величина единицы отсчета по данной координате составляет 7,1 мкм. Оптическая схема измерительных каналов по двум координатам представлена на рис. 3.

Информация об угловом положении кадрового отклоняющего зеркала содержится в реверсивном счетчике текущей координаты Y , являющемся основой кодирующего устройства по данной координате. Состояние реверсивного счетчика может быть считано в память управляющей ЭВМ 1 через буферную память 5 (см. рис. 2).

Рис. 3. Оптическая схема измерительных каналов:

1 — He — Ne-лазер ЛГН-203; 2, 12 — полупрозрачные зеркала; 3 — оптическая расширительная трубка; 4, 5, 11, 13, 15, 17 — плоские зеркала; 6 — линза; 7 — зеркальная призма; 8 — опорная решетка; 9 — конденсор; 10 — ФЭУ измерительного канала X; 14 — ФЭУ измерительного канала Y; 16 — уголкового отражательный элемент (трипель-призма); 18 — зеркало кадрового дефлектора



Координатная информация о текущем положении отклоняющего зеркала используется для прецизионного управления положением луча в плоскости фотоматериала по координате Y. Это управление осуществляется с помощью системы управления дефлектором 14, в которой используется цифроаналоговая замкнутая сервосистема [6], обеспечивающая стабилизацию положения отклоняющего зеркала относительно заданного в цифровом виде от ЭВМ.

Включение и выключение лазерного луча производится АОМ 16 (см. рис. 2). Управляющий сигнал для АОМ ($f = 80$ МГц, $P = 4$ Вт) вырабатывается схемой привода модулятора 12. При подаче управляющего сигнала на АОМ луч технологического лазера 1 (см. рис. 1) отклоняется от своего исходного положения и направляется в апертуру 6. Разработанная схема привода АОМ обеспечивает возможность коммутации управляющего сигнала с длительностью переходного процесса ~ 20 — 30 нс.

АОМ должен включать или выключать луч при движении по строке в соответствии с воспроизводимым рисунком. Подача управляющего сигнала на АОМ инициируется цифровым блоком управления модулятором (БУМ) 8 (см. рис. 2). Информация о координатах переключений луча на данной строке передается от управляющей ЭВМ 1 в БУМ. Передача осуществляется по каналу прямого доступа к памяти 4 с периодом 1,6 мкс в буферную память БУМ ($32 \text{ К} \times 1$ бит) в интервалах между строками раstra. Эта информация представляет собой последовательность пар координат, соответствующих границам пересечения элементов рисунка с данной строкой, причем эти пары могут быть не упорядочены по возрастанию X-координаты, а также частично или полностью перекрываться.

Слияние перекрывающихся элементов и упорядочение их по возрастанию X-координаты производится аппаратно блоком управления модулятором. При этом схема предполагает неограниченный уровень вложения элементов (количество элементов, одновременно находящихся в данном месте строки). Во время рабочей строки (с длительностью, несколько превышающей 3 мс) происходит считывание данных из буферной памяти с периодом ~ 100 нс (средняя тактовая частота ~ 10 МГц), и на выходе блока управления модулятором появляется синхронизированная с рабочей строкой последовательность сигналов, управляющих приводом модулятора.

Исходная информация о рисунке печатной платы хранится в дисковом файле базовой ЭВМ СМ-4, с которой связана управляющая ЭВМ, и может иметь объем до 600 блоков (300 Кбайт). Поэтому при отсутствии специальных средств эту информацию приходится считывать в память управляющей ЭВМ по частям. Это приводит к необходимости приостанавливать процесс прорисовки на время подкачки информации либо организовывать подкачку информации в промежутках между ра-

бочими строками, что не позволяет использовать вычислительные ресурсы управляющей ЭВМ в этих промежутках для других целей. Поэтому был разработан блок расширения памяти (БРП) 2 емкостью 0,5 Мбайт, включенный дополнительно к основной памяти управляющей ЭВМ [7].

БРП работает в режиме последовательного доступа, при котором указываются номер страницы и адрес начальной ячейки в этой странице. Затем последовательное обращение по одному и тому же адресу позволяет осуществлять чтение либо запись в последовательные ячейки расширенной памяти (в возрастающем либо в убывающем порядке) с автоматическим переходом на следующую страницу. Включение БРП позволило хранить в расширенной памяти всю информацию о рисунке платы и освободить процессор управляющей ЭВМ для обработки этой информации в интервалах между рабочими строками.

В режиме считывания вместо фотоматериала в той же плоскости устанавливается носитель графической информации. За ним помещаются конденсор 13 и ФЭУ 14 (см. рис. 1). В частности, при проведении калибровочной процедуры устанавливается эталонный образец, представляющий собой стеклянную пластину, на которой нанесены равнономерно размещенные крестообразные реперы. Образец сканируется лазерным лучом в режиме развертки типа телевизионного раstra. При пересечении лучом штриховой линии реперов на выходе ФЭУ появляется видеосигнал, используемый трековым детектором 9 для формирования трекового сигнала. В момент, соответствующий середине трекового сигнала, координаты светового пятна передаются в буферную память 5. Объем этой памяти составляет 1 К×16 бит, мертвое время записи не превышает 200 нс.

По мере движения луча вдоль строки информация о координатах пересечений луча с элементами рисунка накапливается в буферной памяти. Размер буферной памяти позволяет разместить 512 пар координат. С окончанием строки иницируется запрос на прерывание управляющей ЭВМ, и накопленная информация передается в память ЭВМ (основную либо расширенную). Включение БРП дало возможность за одно сканирование снимать информацию объемом до 10^5 пар координат. По окончании сканирования информация передается в базовую ЭВМ СМ-4 для обработки в режиме «off line».

В качестве управляющей ЭВМ на данном этапе в устройстве используется процессор ДВК Н МС 11100.1. Процессор и вся электроника управления лазерным ГИ (за исключением высоковольтного источника питания ФЭУ и TV-монитора, обеспечивающего контроль за фазовым соотношением сигналов с интерферометрического датчика) размещены в одном корпусе конструктива микроЭВМ «Электроника 60» с использованием ее источников питания. Все узлы электроники управления ГИ, требующие связи с управляющей ЭВМ, имеют непосредственное сопряжение с системной магистралью (Q-bus) ЭВМ.

Общая организация работы лазерного ГИ. Общая организация работы лазерного ГИ в системе автоматизированного проектирования (САПР) в основном аналогична организации работы лазерного графопостроителя растрового типа, описанной в [8]. Коротко ее можно сформулировать следующим образом.

1. Подготовка входной информации для лазерного ГИ, обработка данных калибровочной процедуры, модификация существующего и разработка нового ПО производится на базовой ЭВМ СМ-4. Исходные файлы для подготовки входной информации передаются на диски базовой ЭВМ из САПР по каналу межмашинной связи. Для более эффективного использования ресурсов базовой ЭВМ на ней организован многопользовательский режим работы. Управление прохождением задач осуществляется мультитерминальной операционной системой RSX-11/M. Информация, подготовленная на базовой ЭВМ для прорисовки на лазерном ГИ, передается по каналу межмашинной связи в управляю-

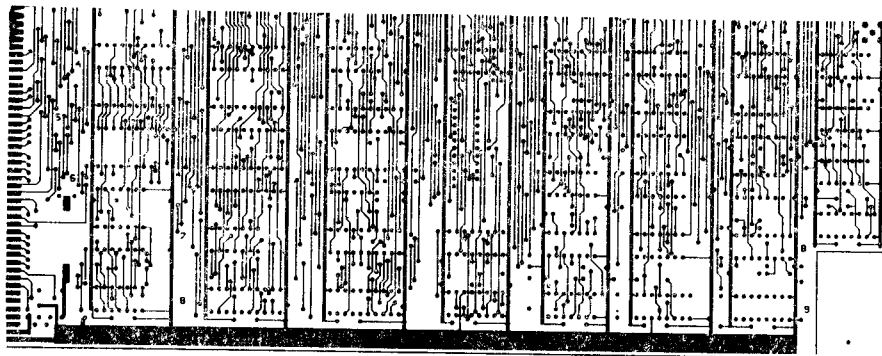


Рис. 4. Фрагмент фотошаблона печатной платы

щую ЭВМ. На управляющую ЭВМ в процессе прорисовки возлагаются задачи чтения входной информации из дискового файла базовой ЭВМ в расширенную память, управления движением отклоняющего зеркала (по координате Y), подготовка из входной информации данных для вывода очередной строки и передача этой информации по каналу ЦДП в память БУМ для последующего управления модулятором. В режиме калибровки управляющая ЭВМ осуществляет управление движением отклоняющего зеркала, передачей информации из буферной памяти в память управляющей ЭВМ и запись этой информации на диск базовой ЭВМ.

2. Калибровка устройства производится эпизодически (один раз в несколько месяцев). Данные калибровки передаются в базовую ЭВМ для обработки в режиме «off line». Результаты калибровки записываются в дисковый файл базовой ЭВМ и используются при подготовке входной информации для коррекции выводимых данных.

3. Запуск программ подготовки входной информации, управляющих программ прорисовки и калибровки осуществляется оператором с помощью командных файлов, требующих от оператора, как правило, минимальных указаний — имени файла, номера стороны.

Заключение. Первоначальный этап комплексной отладки быстродействующего лазерного ГИ был завершён к июлю 1988 г. С этого времени, наряду с работами по дальнейшему его развитию, он начал эпизодически использоваться для изготовления фотошаблонов в процессе производства печатных плат в ИФВЭ. К моменту публикации изготовлено более сотни фотошаблонов, удовлетворяющих требованиям последующих этапов процесса производства печатных плат. На рис. 4 представлен фрагмент фотошаблона, изготовленного на лазерном ГИ.

При выбранной скорости вращения зеркальной призмы 5,25 оборота в с (частота строчной развертки 42 строки в с) время изготовления фотошаблона для печатной платы конструктива «Вектор» составляет менее 2 мин. Таким образом, производительность данного лазерного ГИ повышена более чем на порядок по сравнению с производительностью лазерного фотопостроителя на основе однозеркального дефлектора [4] при увеличенном числе строк разложения рисунка (которое на данном этапе составляет ~ 5000 строк).

Следует отметить, что подход, реализованный при разработке быстродействующего лазерного ГИ (растровый принцип развертки лазерного луча по поверхности фотоматериала, использование калибровочной процедуры для определения систематических искажений с учетом этих искажений на этапе вывода и т. д.), аналогичен подходу, применённому ранее при создании фотопостроителя с однозеркальным дефлектором, который находился в эксплуатации около 5 лет. Поэтому программное обеспечение, разработанное для фотопостроителя с однозеркальным дефлектором, прошедшее пятилетний период эксплуатации и

доводки с необходимым развитием, во многом оказалось применимым для быстродействующего лазерного ГИ. В первую очередь это относится к программам растризации, калибровки, коррекции данных, которые имеют наибольший объем среди всех программ [9]. Разумеется, заново разработаны управляющие, тестовые и диагностические программы.

Авторы признательны академику А. А. Логунову, профессору Л. Д. Соловьеву, профессору В. А. Ярбе, профессору Н. Е. Тюрину за постоянный интерес к данной работе.

Авторы также выражают искреннюю благодарность всем сотрудникам ИФВЭ, оказавшим помощь при создании быстродействующего лазерного генератора изображений и в процессе его опытной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Donahus Joseph P. Laser pattern generator for printed-circuit board artwork generation // Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng.— 1979.— 200.— P. 179.
2. Мачулка Г. А., Стельмах М. Ф., Уладинов А. Б. Лазерная технология в производстве плат печатного монтажа // Радиотехника.— 1985.— № 2.
3. Kenville R. F. Fifteen years of laser recording — where we've been and where we are going // Opt. Eng.— 1981.— 20, N 3.— P. 330.
4. Денисенко А. А., Дунайцев А. Ф., Иванов А. А. и др. Лазерный графопостроитель растрового типа ИФВЭ // Тез. докл. IV Всесоюз. сем. по автоматизации исследований в ядерной физике и смежных областях.— Протвино: ИФВЭ, 1986.
5. Иванов А. А., Морозов А. Ф., Нечаев Ю. С. и др. Кодированные устройства в лазерной установке записи-считывания графической информации // ПТЭ.— 1985.— № 6.
6. Детиненко Н. Е., Иванов А. А., Нечаев Ю. С. и др. Устройство управления зеркальным дефлектором в лазерной установке записи-считывания графической информации // ПТЭ.— 1986.— № 2.
7. Буфан А. М., Иванов А. А., Иванов А. Ан. и др. Блок расширения памяти для микроЭВМ «Электроника 60».— Серпухов, 1989.— (Препр./ИФВЭ; 89—52).
8. Иванов А. А., Максимов Г. М., Нечаев Ю. С. и др. Об организации управления лазерным графопостроителем.— Серпухов, 1985.— (Препр./ИФВЭ; 85—131).
9. Иванов А. А., Максимов Г. М., Нечаев Ю. С. Подготовка входной информации для лазерного графопостроителя растрового типа.— Серпухов, 1984.— (Препр./ИФВЭ; 84—144).

Поступила в редакцию 2 ноября 1989 г.

УДК 681.3

И. Ф. СИВЕРГИНА, Л. П. ЯРОСЛАВСКИЙ

(Москва)

ТЕКСТУРЫ, ИГРА «ЖИЗНЬ» И НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Мир беспорядочно усен
упорядоченными формами.

П. Валери

Введение. Одной из важнейших задач анализа изображений является так называемый текстурный анализ. В последнее время в связи с быстрым развитием машинной графики значительную актуальность получила также проблема синтеза текстурных изображений. Понятие текстуры не имеет пока общепринятого формального определения, хотя широко используется в конкретных прикладных задачах, где оно объясняется, как правило, с помощью примеров или слов-синонимов, таких, как зернистость, шероховатость, трещиноватость и т. д. Во многих областях науки и техники при обучении специалистов пользуются специальными альбомами текстурных изображений типа альбома Бродатца [1]. Эти неформальные качественные представления были достаточны, пока речь шла об обучении визуальному анализу изображений. Однако машинный