

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ЗАПИСИ, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.327.68 : 778.38

Л. В. ВЫДРИН, Н. Н. ВЬЮХИНА, И. С. ГИБИН,  
В. Н. ЗАТОЛОКИН, С. Ф. КИБИРЕВ, Т. Н. МАНТУШ,  
Ю. Е. НЕСТЕРИХИН, Б. Н. ПАНКОВ, Е. Ф. ПЕН,  
П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, Ю. Н. ТИЩЕНКО, А. В. ТРУБЕЦКОЙ  
(Новосибирск)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ (ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ) СИСТЕМА ПАМЯТИ

Постоянная голографическая память может найти применение в составе информационных систем (машин), предназначенных для сбора, хранения и обработки данных в проблемно-ориентированных каталогах, картотеках, справочниках. Массивы данных в таких системах обновляются сравнительно медленно, а обработка информации сводится чаще всего к классификации и упорядочиванию данных, их поиску и выборке по признакам.

Память информационных систем должна быть иерархической, повышенной емкости, долговременной, помехоустойчивой к возможным дефектам среды — носителя информации, устойчивой к электромагнитным, радиационным и другим воздействиям, пригодной для хранения двоично-кодированных данных и данных в виде картин-документов (текст, рисунки, снимки и т. п.). Из существующих технологий памяти этим требованиям наиболее полно удовлетворяет постоянная голографическая память, которая, кроме того, в силу принципиальной возможности параллельной выдачи данных массивами в  $10^3 \div 10^4$  бит (физическая страница) способна обеспечивать весьма высокую скорость обработки данных ( $10^9 - 10^{10}$  бит/с). На ее основе возможно создание, в частности, многофункциональных систем памяти, которые при учете особенностей конкретного приложения (структура данных, язык описания документов) могут быть развиты до уровня прикладной информационной системы [1].

Настоящая статья обобщает опыт работы ИАиЭ СО АН СССР по созданию экспериментальной модели одной из таких систем — оптико-электронной (голографической) системы памяти (ОЭСП) с функциями накопления, долговременного хранения, поиска и выдачи человеко- и машиночитаемых данных. ОЭСП включает в себя специализированные оптико-механические, оптические, фотоэлектронные и электронные устройства для записи, хранения, считывания, обработки и выборки данных; ЭВМ, реализующую управление элементами системы, и ее внешние устройства; электронные устройства системного обмена данными. Поэтому статья дает представление о структурно-функциональной организации экспериментальной модели ОЭСП, о разработанных нами специализированных аппаратных и программных средствах и о результатах их исследования в составе ОЭСП. На данном этапе работы исследование разработанных средств проводилось в основном с целями реализации качественной голографической записи, выборки и надежного считывания не

отдельных страниц двоично-кодированных данных, как это следует из большинства известных работ по голограммным ЗУ, а массива из  $10^3$ — $10^4$  таких страниц; оптико-электронной параллельной (ассоциативной) логической обработки страниц двоично-кодированных данных емкостью  $32 \times 32$  бит — обработки, позволяющей существенно ускорить выполнение операций простого и сложного поисков данных; голографической записи, автоматической выборки и отображения документов. В рассматриваемой работе цели достижения максимальной (для информационных систем) емкости памяти не ставилось.

**Структура ОЭСЦ.** Специализированные аппаратные средства ОЭСЦ образуют подсистему подготовки и записи данных и подсистему хранения, считывания и обработки данных. Первая из них предназначена для голографической записи вводимых данных на стандартизированных модулях памяти. Запись проводится с помощью промежуточного микрофильма, на котором предварительно формируются страницы двоично-кодированных, текстовых или графических данных. Вторая подсистема образует информационный архив ОЭСЦ с аппаратным поиском данных и ориентирована на информационное обеспечение человека и внешней ЭВМ. Обе подсистемы работают автономно, так как операции записи и чтения голограмм проводятся раздельно, требуют различного времени (из-за использования нереверсивной среды) и оперативно не совмещаются. В системе используется базовый комплект ЭВМ М-400 с емкостью ОЗУ 8 К слов, внешними устройствами (ПМ, АЦД, ФС, ПЛ) и перфоленточной операционной системой. Магистральная часть системы содержит три крейта КАМАК и может наращиваться до семи крейтов.

Конфигурация ОЭСЦ показана на рис. 1. Процессор М-400 взаимодействует с указанными подсистемами через три крейт-контроллера (КК1—КК3) программного обмена. Используемые крейт-контроллеры аналогичны устройствам, описанным в [2]. Каждый из них управляет одним крейтом КАМАК, обеспечивая прием команд и других управляющих данных от ЭВМ, обмен данными с модулями, предварительную обработку запросов, формирование векторов прерывания, проверку, тестирование, а также выдачу всех необходимых сигналов КАМАК.

Магистраль ЭВМ М-400 ограничивает возможность подключения значительного числа внешних устройств, поэтому в систему введен расширитель общей шины (РОШ). В качестве РОШ используется отдельный крейт КАМАК, через который на общую шину (ОШ) выходят рабочие крейты системы; магистраль этого крейта является продолжением общей шины. В составе РОШ имеются два модуля, один из которых повторяет выходные сигналы ОШ, а второй производит сборку входных сигналов от кон-

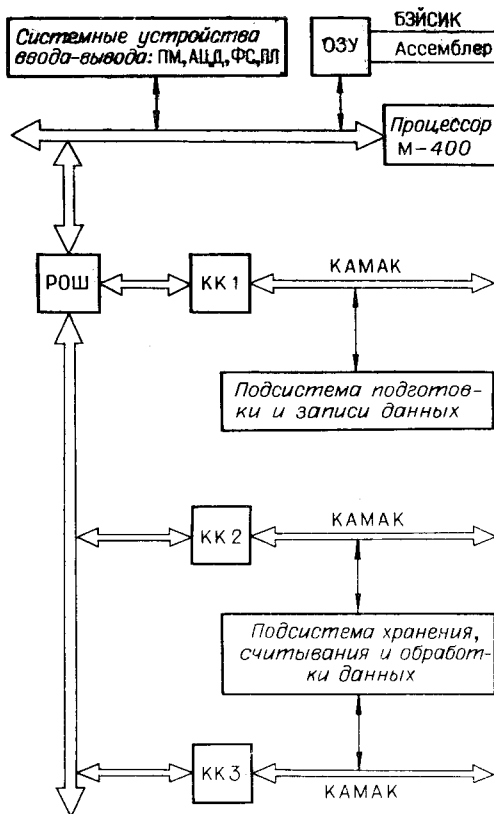


Рис. 1.

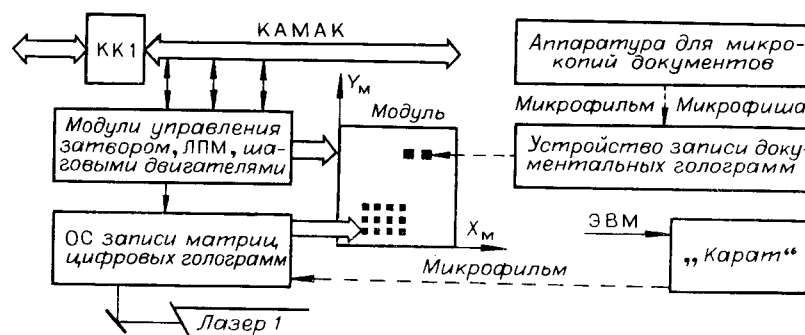


Рис. 2.

троллеров. Управляющая станция крейта РОШ является нерабочей, а все нормальные станции могут использоваться для переходных модулей включения крейт-контроллеров.

**Запись данных.** В состав подсистемы подготовки и записи данных, показанной на рис. 2, входят устройство записи матриц двоично-кодированных (цифровых) данных; устройство записи матриц текстовых и графических (документальных) данных; аппаратура для микрофильмирования.

Микрофильм (набор фототранспарантов) с двоично-кодированными данными изготавливается на устройстве «Карат» [3] по методике [4]. Размер кадра микрофильма (страница —  $32 \times 32$  бит) —  $10 \times 10$  мм. «Карат» работает с автономной ЭВМ. Полученный микрофильм используется далее в устройстве записи цифровых данных.

Оптическая система (ОС) устройства записи, как показано на рис. 2, формирует сигнальный и опорный пучки света и обеспечивает голографическую запись текущего кадра микрофильма на заданном участке модуля памяти. Для перемещения модуля использован подвижный двухкоординатный стол от микроскопа БМИ, для смены кадров микрофильма — лентопротяжный механизм кинокамеры РФК-5.

В пределах модуля памяти, представляющего собой фотоноситель размером  $51 \times 51$  мм, могут быть записаны матрицы голограмм с шагом, кратным минимальному шагу 0,4 мм, что достигается с помощью программного управления перемещением стола.

Максимальная размерность модуля памяти, который может быть записан, составляет  $128 \times 128$  голограмм (размер голограммы — 0,3 мм, шаг между ними — 0,4 мм). При размерности страницы данных  $32 \times 32$  бит емкость такого модуля равна  $1,6 \cdot 10^7$  бит.

Электронная часть устройства записи цифровых данных включает блоки управления фотозатвором, лентопротяжным механизмом (ЛПМ) и шаговыми двигателями, используемыми для перемещения модуля памяти в координатах  $X_m, Y_m$ .

Более подробные сведения об устройстве записи матриц цифровых данных имеются в [5].

Микрокопии документов получают с помощью съемочной камеры типа DOCUMATOR. Документальные голограммы записываются на таких же модулях, что и цифровые. Для этой цели используется устройство (на рис. 2 не показано) записи матриц документальных данных. Структура и принцип действия этого устройства подобны устройству записи матриц цифровых данных. Количество голограмм в модуле определяется размером документов и требуемым количеством элементов разрешения. Например, при записи страниц текста с листов формата  $210 \times 256$  мм модуль будет содержать около  $25 \times 25$  голограмм.

Модули памяти с цифровыми и документальными данными используются в составе второй подсистемы ОЭСП.

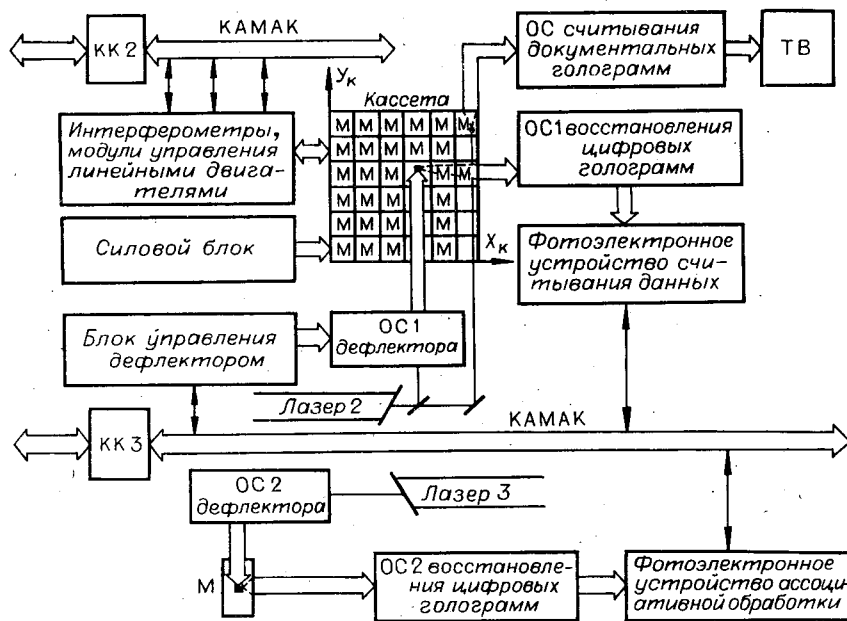


Рис. 3.

**Хранение, считывание и обработка данных.** Электромеханические, оптические, фотоэлектронные и электронные устройства архива ОЭСП сопряжены с ЭВМ М-400 с помощью контроллеров КК2, КК3 (рис. 3).

Архивная память системы организована на основе кассеты, содержащей  $6 \times 6 = 36$  горизонтально-ориентированных модулей памяти. Такое расположение модулей не является оптимальным, а вызвано конструктивными особенностями устройства двухкоординатного позиционирования «Зенит» [6], использованного нами для адресной выборки подмассива голограмм, подлежащих чтению. Максимальное время перемещения кассеты (в поле  $420 \times 420$  мм) — около 3 с. Общая емкость памяти кассеты —  $5,76 \cdot 10^8$  бит. В составе устройства позиционирования имеются интерферометры, модули управления линейными двигателями для перемещения кассеты, силовой блок.

Вторая ступень выборки цифровых данных — выборка страницы из подмассива  $32 \times 32$  голограмм — выполняется акустооптическим дефлектором на парателлурите с временем переключения светового луча  $\sim 10$  мкс, полосой рабочих частот 50—100 МГц, отношением сигнал/фон 70:1, управляющей электрической мощностью (на одну ячейку) 0,5 Вт [7, 8]. Выборка документальных голограмм осуществляется только за счет электромеханического перемещения без дефлектора.

Оптическая система считывания цифровых данных с подмассива  $32 \times 32$  голограмм содержит лазер, двухкоординатный акустооптический дефлектор (ОС1 дефлектора), призму вывода «нулевого» пучка и восстанавливающий объектив (ОС1 восстановления цифровых голограмм). Считывание и ввод данных в память ЭВМ проводится с помощью фотоэлектронного устройства, содержащего интегральную фотоматрицу ( $32 \times 32$  фотоприемников), разрядные усилители (с регулируемым порогом), буферное ЗУ на одну страницу  $32 \times 32$  бит [9, 10], блок связи с магистралью КАМАК, блоки адреса и управления. Структурная схема этого устройства приведена на рис. 4, а.

Изображения документов, считываемые с документальных голограмм, воспроизводятся на экране телевизора. Для этих целей исполь-

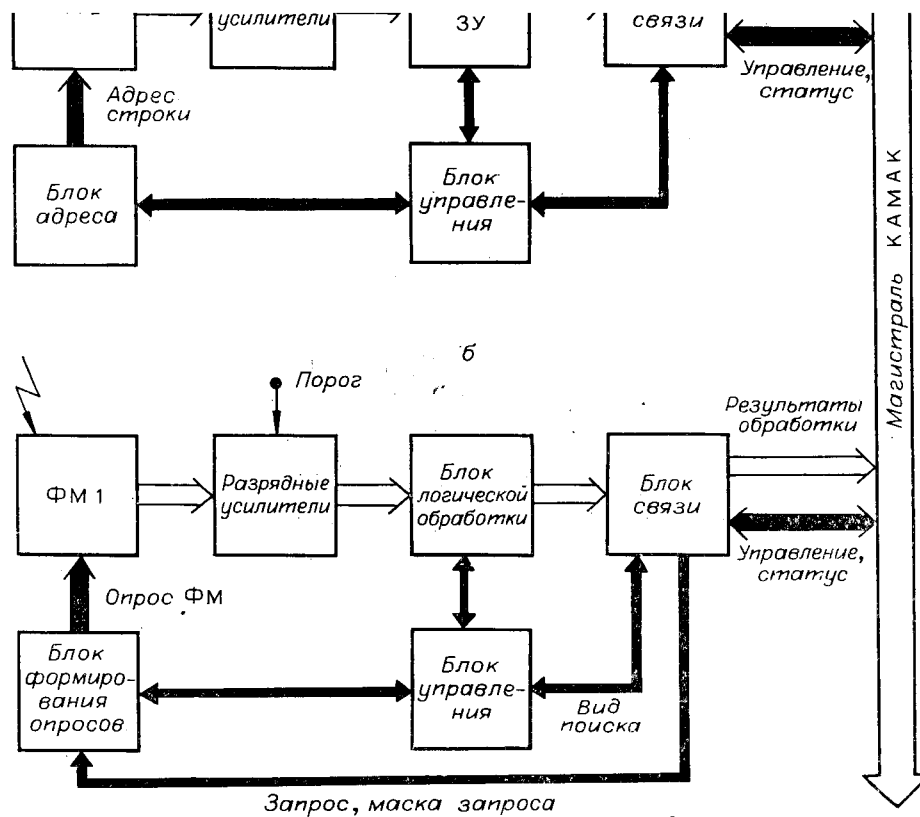


Рис. 4.

зается простейшая оптическая система (ОС считывания документальных голограмм) и передающая телевизионная камера.

В рассматриваемой подсистеме применен быстродействующий «каталог», предназначенный для хранения и поисков (простого и сложного) адресов данных по заданному описанию (признак, индекс, шифр, ключ). Каталог имеет постоянное голограммное ЗУ (лазер  $Z$ , ОС2 дефлектора, модуль (или модули) памяти, ОС2 восстановления цифровых голограмм) и фотоэлектронное устройство ассоциативной обработки страниц двоично-кодированных данных. ЗУ используется для хранения описаний данных в страничном формате ( $32 \times 32$  бит) и выборки страниц, фотоэлектронное устройство — для параллельной логической обработки содержимого страниц, последовательно выбираемых из постоянного голограммного ЗУ. Фотоэлектронное устройство, приведенное на рис. 4, б, включает интегральную фотоматрицу ( $32 \times 32$  фотоприемника), разрядные усилители с регулируемым порогом, блоки логической обработки, связи с магистралью КАМАК, формирования опросов и управления [11]. Алгоритмы работы этих блоков определяются запросом, маской запроса и видом поиска, данные о которых поступают от ЭВМ перед началом обработки страниц. После этого устройство функционирует автономно и выдает

татор БЕИСИК, который выполняет некритичные ко времени операции: диалог, предварительное формирование массивов управляющих данных и др. Программы, работающие с устройствами ОЭСП в реальном времени, написаны на Ассемблере.

Программные средства рассчитаны на проведение в ОЭСП в диалоговом режиме следующих работ:

1) воспроизведение раstra акустооптического дефлектора для оценки равномерности дифракционной эффективности ячеек в полосе рабочих частот, геометрических искажений и настройки оптической схемы дефлектора;

2) запись массивов голограмм в модулях памяти;

3) адресная выборка массивов голограмм из кассеты (минимальный адресуемый блок — физическая страница), их считывание с программным контролем и диагностикой ошибок;

4) логическая параллельная обработка страниц данных в фотоэлектронном устройстве каталога с выдачей на печать сообщений о его результатах;

5) определение разброса интенсивностей в оптических изображениях страниц, восстанавливаемых из голографических модулей памяти (достигается путем автоматического измерения и выдачи на печать уровней выходных сигналов фотоприемных интегральных матриц);

6) тестирование электронных модулей КАМАК и крейт-контроллеров системы.

Особенности использования интерпретатора БЕИСИК при автоматизации исследований элементов и устройств голографической памяти рассмотрены в [13].

**Экспериментальные результаты.** Аппаратные и программные средства ОЭСП использованы для экспериментального исследования характеристик и режимов работы акустооптического дефлектора, интегральных фотоматриц, фазовых масок, двухкоординатных устройств позиционирования, блоков КАМАК и созданных на их основе специализированных оптико-электронных устройств для записи, выборки, считывания, обработки и отображения массивов голограмм с управлением от ЭВМ. Результаты исследования отдельных элементов ОЭСП уже представлены в ряде публикаций [5, 7—11, 14, 15]. Поэтому здесь приведем только сведения, характеризующие работу подсистем ОЭСП.

С помощью подсистемы подготовки и записи данных проведена запись массивов голограмм с тестовыми страницами  $32 \times 32$  бит («шахматное», «единичное» поля, в парафазном коде и др.). Фотоноситель модуля памяти — высокоразрешающая фотоэмульсия на стеклянной подложке. Запись проводилась на зеленой длине волны света. Дифракционная эффективность голограмм — 1% (при восстановлении аргоновым лазером). Отношение средних интенсивностей света, соответствующих «1» и «0», 20 : 1. Флуктуации интенсивностей «1» —  $\pm 30\%$ , «0» —  $\pm 50\%$ . Разброс дифракционных эффективностей в подмассиве  $32 \times 32$  голограммы составлял не более  $\pm 10\%$ . Максимальная скорость записи  $\sim 100$  гол./мин.

С помощью второй подсистемы реализована адресная выборка любого из  $6 \times 6 \times 4 \times 4 = 576$  подмассивов ( $32 \times 32$  голограммы) и установка их на позиции считывания с погрешностью, не превышающей 20 мкм. Выборка осуществлялась с помощью электромеханического устройства позиционирования путем двухкоординатного перемещения кассеты с модулями памяти.

Фотосчитывание и ввод в ЭВМ тестовых страниц данных проводились с массива  $16 \times 16$  голограмм, расположенных с шагом 0,8 мм. Эти голограммы заполняли поле, соответствующее массиву  $32 \times 32$  голограммы при минимальном шаге записи 0,4 мм. Адресация к голограммам осуществлялась с помощью двухкоординатного акустооптического дефлектора. Результаты фотосчитывания отображались на экране алфавитно-цифрового дисплея. В этих экспериментах наблюдалось порядка одной ошибки на  $10^4$  бит введенных в ЭВМ данных.

Результаты фотосчитывания существенно зависят от непараллельности считывающих пучков света, формируемых дефлектором; aberrаций восстанавливающего объектива, в качестве которого использован серийный фотообъектив «Гелиос-44/2»; разбросов интенсивностей в изображениях «1» и «0» и уровней выходных сигналов ячеек фотоматрицы. Имеются реальные возможности для уменьшения влияния большинства из указанных факторов и улучшения результатов фотосчитывания. В частности, лучшие результаты будут получены при применении новой, более совершенной интегральной фотоматрицы ( $32 \times 32$  фотоприемника) с отношением  $\alpha = I_{T \max} / I_{T \min} = 1,13$  ( $I_{T \max}$  — максимальное значение темнового тока на выходе ячейки, а  $I_{T \min}$  — минимальное значение) и разбросом темновых токов (по отношению к среднему)  $\pm 6\%$ . Для сравнения отметим, что фотоматрица, используемая нами в экспериментах, имеет  $\alpha = 1,6$ , а разброс —  $\pm 24\%$ .

Проведены также автоматическая выборка, считывание и отображение тестовых изображений документов (текст, тест-таблица, эскиз). Отображение осуществлялось на телевизионном и диффузном экранах. Голограммы документов записаны с микрофильма на пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников по методике [15].

Исследована работа фотоэлектронного устройства, предназначенного для параллельной (ассоциативной) обработки данных. Устройство создано на основе интегральной фотоматрицы с  $\alpha = 1,13$ , работающей в режиме, при котором энергия насыщения не превышала  $0,3 \cdot 10^{-11}$  Дж. На оптический вход устройства подавались изображения двоичных страниц с реальным модулем памяти. Решены тестовые задачи простого и сложного поисков. При использовании лазера ЛГ-79 с  $\lambda = 0,63$  мкм время накопления в фотоматрице составляло 60 мкс. Слова опроса фотоматрицы формировались на частоте 1 МГц, что при емкости обрабатываемой страницы  $1024$  бит соответствует скорости обработки данных  $10^9$  бит/с.

**Заключение.** Созданные аппаратные и программные средства позволили экспериментально подтвердить возможность автоматической работы ОЭСП в следующих режимах:

- 1) запись данных в модули постоянной голографической памяти с максимальным форматом  $128 \times 128$  голограмм (диаметр — 0,3, шаг — 0,4 мм); скорость записи — 100 гол./мин;
- 2) выборка любого из 576 подмассивов данных (из  $32 \times 32$  голограмм) в течение 3 с;
- 3) фотосчитывание данных в пределах поля одного подмассива с частотой ошибок около  $10^{-4}$ \*; ведутся работы по повышению надежности фотосчитывания;
- 4) параллельная (ассоциативная) логическая обработка страниц ( $32 \times 32$  бит) цифровых данных по заданному поисковому признаку с производительностью  $10^9$  бит/с; решены тестовые задачи простого и сложного поисков;
- 5) выборка произвольного документа из памяти и его отображение на экране; время выборки — 3 с.

\* Достигнутый уровень надежности считывания характеризует не предельную надежность голографической памяти, а текущий технологический уровень эксперимента.

По сравнению с системой HRMR [16], являющейся в настоящее время наиболее совершенной из известных нам систем голографической архивной памяти, ОЭСИ имеет преимущества по времени поиска, считывания и отображения данных. Однако ОЭСИ будет, по-видимому, уступать системе HRMR в объемной плотности упаковки данных, что связано с использованием не микрофиш, как в HRMR, а модулей памяти на стеклянной подложке. Выбор такого решения обусловлен отсутствием качественных микрофиш отечественного производства.

Авторы считают необходимым отметить, что данная ОЭСИ не могла быть создана без использования результатов работы В. Е. Бутта, В. Н. Вьюхина, Е. А. Ковалева, Л. В. Бурого, А. М. Щербаненко, В. П. Кирьянова, В. П. Коронкевича, А. А. Блока, В. А. Домбровского, А. И. Чернышова, В. В. Ванкошева, А. М. Васильева.

Кроме того, они выражают благодарность А. Н. Касперовичу за полезные замечания, сделанные им при чтении рукописи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Твердохлеб Н. Е. Голографическая память и информационные машины.— Автометрия, 1980, № 2.
2. Мячев А. А., Филинов Е. П. Система КАМАК. Устройство сопряжения КАМАК с машиной ЭВМ. М., изд. ЦНИИТЭИприборостроения, 1976, с.50—65.
3. Авдеев В. С., Васильев С. Т., Мамонтов Г. М. и др. «Карат» — устройство вывода графической и буквенно-цифровой информации из ЭВМ на микрофильм.— Автометрия, 1976, № 1.
4. Мантуш Т. П., Пен Е. Ф., Уманцев Г. Д. Изготовление фототранспарантов для ввода информации в голограммные ЗУ.— Автометрия, 1975, № 3, с. 130—132.
5. Выдрина Л. В., Мантуш Т. П., Панков Б. П. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм.— Автометрия, 1980, № 2.
6. Бурый Л. В., Коронкевич В. П., Пестерихин Ю. Е. и др. Прецизионный фотограмметрический автомат.— Автометрия, 1974, № 4, с. 83—89.
7. Тищенко Ю. Н., Трубенкой А. В. Некоторые вопросы создания и исследования акустооптического дефлектора на монокристаллах  $\text{TeO}_2$ .— Автометрия, 1979, № 4, с. 87—95.
8. Вьюхин В. Н., Ковалев Е. А., Курочкин В. В., Юношев В. П. Быстродействующий двухканальный синтезатор частот.— Автометрия, 1976, № 3, с. 35—41.
9. Вьюхина Н. П., Кащеев Э. Л., Лукецкая О. А. и др. Система считывания страниц информации для голограммных ЗУ.— Автометрия, 1976, № 6.
10. Бутт В. Е., Панков Б. П. Устройства сопряжения интегральной фотоматрицы с системой считывания страниц информации в оптическом ЗУ.— Автометрия, 1979, № 3, с. 74—78.
11. Вьюхина Н. П., Кибирев С. Ф., Панков Б. П. Фотоматричное ассоциативное ЗУ.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979, с. 149—150.
12. Кибирев С. Ф., Лебедев Н. С., Наймарк С. И. и др. Ассоциативный поиск на фотоматрице ГЗУ.— В кн.: III Всесоюз. конф. по голографии. (Тезисы докладов.) Л., изд. ЛПИФ, 1978, с. 270—271.
13. Мантуш Т. П. Использование интерпретатора BASIC M-400 в системе автоматизации исследований голографической памяти.— Автометрия, 1979, № 1, с. 65—70.
14. Левин В. Я., Пен Е. Ф., Солдатенков И. С. и др. Изготовление и исследование фазовых масок для устройств хранения и обработки информации.— ОМП, 1978, № 3, с. 43.
15. Климин А. Н., Пен Е. Ф., Ремесник В. Г. и др. Рельефные голограммы на пленках ХСП.— Автометрия, 1979, № 1, с. 70—74.
16. Nelson R. H., Lught A. V., Zech R. G. Holographic Data Storage and Retrieval.— Opt. Engineering, 1974, vol. 13, N 5, p. 429—434.

*Поступила в редакцию 14 сентября 1979 г.*