

7. **Multiple Controllers in a CAMAC Crate.**— Esone Committee, EUR 6500 e. Luxemburg, CEC, 1978.
8. **CAMAC Serial Highway System and Serial Crate Controller Type L-2.**— EUR 6100 e. Luxemburg, CEC, 1975.
9. **Recommendations for CAMAC Serial Highway Drivers and Lam Graders for SCC-L2.**— Esone/RTB/02. Luxemburg, CEC, November, 1977.
10. **Morris D. Revised Data-Interface Standards Permit Faster Data Rates and Longer Cables. New Chips and RS 232 Adapters, Simplify their Use.**— Electronic Design, 1977, vol. 18, p. 138—141.
11. **Нгуен Фук.** Универсальные устройства сопряжения с ЭВМ и пересчетные модули в стандарте КАМАК.— Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Дубна, изд. ОИЯИ, 10-8990, 1975.
12. **Larsen R. S. "Fastbus" Status of Development of a Standard High Speed Data Acquisition Bus for High Energy Physics.**— CERN CAMAC News. Appendix A, 1978, February, N 13.
13. **Zacharov V. Data Transfer in on-Line Systems.**— In: Proc. of the 1978 CERN School of Computing. Geneva, CERN 78-13, 1978, p. 88.
14. **CAMAC 1977.**— Kinetic Systems Catalogue. Lockport, 111, USA, 1977.
15. **Колпаков И. Ф.** Некоторые критерии для выбора ЭВМ в автоматизированных системах физики высоких энергий.— Автометрия, 1980, № 3.
16. **Беккер П., Йенсен Ф.** Проектирование надежных электронных схем. (Пер. с англ.). М., Сов. радио, 1977.
17. **Crowley-Milling M. C.** Experience with Control System for the SPS. Geneva, CERN 78-09, 1978.
18. **Horelick D.** The Confusing Digital Standards — are They Related.— IEEE Trans., 1975, vol. NS-22, p. 488—493.

*Поступила в редакцию 23 июля 1979 г.*

УДК 621.3.087 : 681.3

**А. М. ЩЕРБАЧЕНКО, Ю. И. ЮРЛОВ**

*(Новосибирск)*

## **ЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ КАМАК ПРЕЦИЗИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

Лазерный интерферометр — один из перспективных прецизионных датчиков, используемых для преобразования различных физических параметров в сигналы, пропорциональные сдвигу фаз или частоте электрических сигналов переменного тока. Применение лазерных интерферометров в качестве первичных преобразователей открывает принципиальную возможность для достижения больших точностей измерения последних, чем при использовании преобразователей другого типа.

Первые лазерные интерферометры как у нас в стране, так и за рубежом использовались в составе приборов для измерения таких параметров, как перемещение, скорость, вибрация, гравитационное ускорение, показатель преломления прозрачных материалов. Каждый из них содержал стабилизированный по частоте лазер, оптический блок (интерферометр) и электронную аппаратуру, осуществляющую операции счета числа интерференционных полос, преобразования их в заданный код, вычисления, регистрации и индикации результатов измерения.

Расширение круга задач, решаемых с помощью автономных устройств, наличие в них однотипных функциональных узлов, возможность совместного использования лазерных интерферометров и современных средств вычислительной техники потребовали применения новых принципов построения электронной части таких устройств, с тем чтобы обеспечить возможность создания из набора универсальных электронных

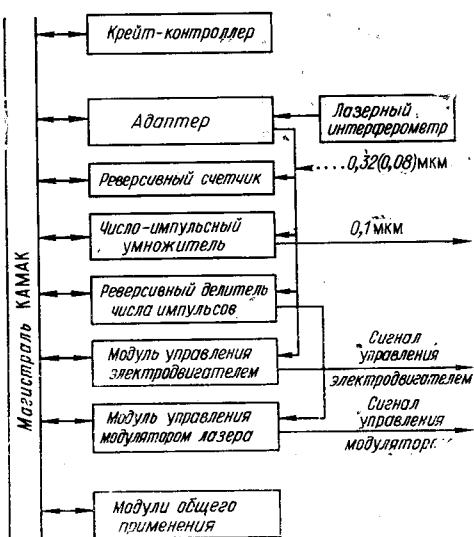


Рис. 1. Структурная схема лазерных измерительных и управляющих систем КАМАК.

Схематически указанный набор представлен на рис. 1. Он подразделяется на специализированные электронные модули, предназначенные для непосредственной работы с сигналами лазерных интерферометров или других лазерных устройств, и модули общего применения.

К числу специализированных модулей относятся адаптер, реверсивный счетчик, число-импульсный умножитель, реверсивный делитель числа импульсов, модули управления электродвигателем и модулятором лазера.

Набор модулей общего применения включает цифровой дисплей, индикатор магистрали, счетчики импульсов, цифроаналоговый и аналого-цифровой преобразователи, преобразователи кодов, модуль ОЗУ, интерфейсы для цифровых измерительных приборов, контроллеры для ЭВМ.

Ниже рассмотрены требования к специализированным функциональным блокам и приведены технические характеристики разработанных модулей; показаны примеры использования этих модулей в системах, управляемых от ЭВМ различного типа, в том числе от ЭКВМ ТЗ-16М, для которой нами разработан контроллер ее связи с крейтом КАМАК [5].

Среди специализированных модулей лишь модули адаптера должны быть различными для интерферометров, построенных на основе одночастотного или двухчастотного лазера. Однако независимо от типа лазерного интерферометра выходными сигналами адаптера должны быть сигналы, определяющие направление перемещения призмы, и импульсные сигналы, частота которых пропорциональна скорости движения призмы, а интервал следования определяет дискретность перемещения подвижного отражателя лазерного интерферометра, кратную длине волны лазера. Модуль адаптера должен содержать также дешифратор команд (Дш) и сервисный регистр (СР) для регистрации и маскирования запросов, возникающих вследствие сбоя системы стабилизации частоты лазера или уменьшения амплитуды выходного сигнала интерферометра ниже порога, обеспечивающего надежную работу формирующих усилителей модуля. Структура остальных модулей остается постоянной и не зависит от типа лазерного интерферометра.

блоков систем для решения разнообразных задач измерения и управления.

Такой подход был реализован в Институте автоматики и электротехники СО АН СССР, где на основе стандарта КАМАК разработан набор функциональных блоков для прецизионных измерительных и управляющих систем, который использовался, в частности, при создании фотограмметрического автомата «Зенит», голограммного запоминающего устройства, лазерного фотоустройства для синтеза оптических элементов с осевой симметрией [1, 2], а также ряда программно-управляемых систем измерения различных физических параметров, в качестве первичных преобразователей которых были использованы лазерные интерферометры [3, 4].

Модуль реверсивного счетчика предназначен для счета числа импульсов в режиме сложения и вычитания. Этот модуль, как и модуль, рассмотренный в [6], содержит дешифратор команд, реверсивный счетчик (РС), схему управления режимом его работы, регистр данных (РД) и схему индикации. Предварительная установка разрядов счетчика осуществляется посредством магистрали КАМАК, через которую может быть прочитано содержимое счетчика, инициируемое на передней панели с помощью светодиодов. Модуль разработан в двух вариантах: в первом из них используется двоичный, а во втором — двоично-десятичный реверсивный счетчик. Максимальная частота счетных импульсов 5 МГц.

Число-импульсный множитель умножает последовательность импульсов на постоянный коэффициент, кратный длине волны лазера и выраженный в единицах длины выбранной системы измерения. Модуль содержит дешифратор команд, регистр данных коэффициента умножения (РД) и цифровой интегратор с последовательным переносом.

Принцип построения такого множителя подробно рассмотрен в [7]. На вход модуля поступают импульсы от адаптера. Дискретность входных импульсов равна  $\lambda/8$ , где  $\lambda$  — длина волны лазера. Дискретность выходных импульсов модуля 0,1 мкм. Модуль обеспечивает умножение на постоянный коэффициент в реальном масштабе времени последовательности импульсов в диапазоне частот 0-1 МГц.

Реверсивный делитель числа импульсов формирует импульсы с заданным интервалом дискретности. Модуль содержит дешифратор команд, регистр данных для коэффициента деления, реверсивный счетчик и схему совпадения. Дискретность импульсов на выходе схемы совпадения может изменяться в диапазоне ( $2^0$ — $2^{16}$ ) 0,1 мкм. Запись коэффициента деления в регистр проводится через магистраль КАМАК. Максимальная частота импульсов 5 МГц.

Модуль управления электродвигателем предназначен для использования в следящих системах прецизионных установок, динамика которых описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Требования, предъявляемые к системам управления таких установок, достаточно жестки и противоречивы. С одной стороны, они должны обеспечивать быстрый перевод объектов управления — кареток с фотоносителем, вес которых может достигать десятков килограммов, из одного положения в другое со скоростью до 1 м/с за время, близкое к оптимальному; с другой стороны, погрешность позиционирования при этом не должна превышать десятые доли микрона. Для решения этой задачи в модуле реализовано двухрежимное управление, при котором для быстрого перевода объекта в некоторую сравнительно малую зону используется квазиоптимальное, а для точного позиционирования в малой зоне — пропорциональное управление [8].

При разработке модуля основное внимание было уделено созданию цифровых регуляторов с релейным управлением и PID-регуляторов. Модуль содержит дешифратор команд, сервисный регистр, реверсивный счетчик с регистром данных, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), квазиоптимальный и PID-регуляторы, дешифратор зоны точного управления, индикатор на светодиодах, а также клавишный регистр для управления модулем в режиме "off line".

Цифровой регулятор первой ступени реализует управление, близкое к оптимальному, и включается в случае, если величина рассогласования превышает размеры зоны сравнительно малого рассогласования по координате. Весь диапазон перемещений, в котором работает скоростная ступень, разбит на несколько зон, в каждой из которых осуществляется линейное преобразование ошибки рассогласования в частоту следования импульсов. Формирование знака управляющего сигнала квазиоптималь-

ного регулятора осуществляет логическое устройство по сигналам знаков ошибки рассогласования, направления движения объекта управления и разности частот, пропорциональных реальной скорости объекта и ошибке рассогласования.

Во второй ступени управления используется PID-регулятор, особенностью которого является то, что все составляющие регулирующего воздействия представлены как частоты следования импульсов, причем составляющие  $P$  и  $I$  предварительно преобразуются в цифровую форму с помощью цифровых интеграторов. Отсутствие аналоговых интегрирующих устройств и простота многоразрядных преобразователей код — частота существенно упростили структуру PID-регулятора и повысили надежность его работы.

Разработанный модуль обеспечивает управление перемещением кареток прецизионных устройств в режимах точного позиционирования и движения с заданной скоростью. Движение с постоянной скоростью реализуется аппаратно как квазиоптимальным, так и пропорциональным регулятором, причем во время движения с постоянной скоростью проводится блокировка импульсов, поступающих на вход РС, который используется в этом режиме как регистр кода скорости и перемещения. Если код скорости больше кода числа, соответствующего значению зоны пропорционального управления, то работает квазиоптимальный регулятор, а при невыполнении этого условия — PID-регулятор.

Программный режим механического перемещения осуществляется с помощью сигналов цифроаналогового преобразователя, управление которым проводит ЭВМ, осуществляя по показаниям реверсивного счетчика вычисление значения управляющего сигнала в соответствии с выбранным алгоритмом.

При работе модуля управлением электродвигателем скорость перемещения каретки бывает иногда достаточно велика. Сбой в системе приводит к тому, что каретка может достигать своего крайнего положения с большой скоростью, что вызывает деформацию или разрушение механических узлов прецизионных установок. Для предотвращения таких случаев в модуле предусматривается подача сигналов, блокирующих управление квазиоптимального и PID-регуляторов. При этом формируется сигнал защиты, осуществляющий торможение электродвигателя. Модуль управления при срабатывании защиты выставляет запрос 1, реагируя на который ЭВМ обращается к сервисному регистру модуля и по состоянию сигналов триггеров статуса определяет, какое из крайних положений (реперов) занимает каретка.

Второй запрос формируется в случае, когда каретка достигает требуемого положения с заданной точностью. Разрешающая способность модуля по координате в режиме позиционирования составляет 0,32 мкм в диапазоне перемещений  $\pm 0,32$  ( $2^0$ — $2^{23}$ ) мкм. Диапазон регулирования по скорости изменяется в пределах от 10 мкм/с до 0,5 м/с.

Разработанный модуль может использоваться также для управления скоростью вращения двигателей, содержащих частотный датчик числа оборотов.

Модуль управления модулятором лазера формирует управляющий сигнал постоянного тока в диапазоне 0—2,048 В с минимальной дискретностью, равной 4 мВ. Он содержит дешифратор команд, регистр управления (РУ), счетчик импульсов, вентили и цифроаналоговый преобразователь. Уровень выходного сигнала цифроаналогового преобразователя задается кодом, фиксируемым счетчиком импульсов. Запись управляющего кода в счетчик проводится через магистраль или от генератора импульсов, подключаемого к счетному входу счетчика. Такие режимы предназначены для использования модуля в фотопостроителях, управляемых ЭВМ различного быстродействия. При записи управ-

ляющего кода в счетчик от генератора импульсов изменение выходного напряжения проводится линейно. Запись кода в счетчик через магистраль позволяет устанавливать уровень управляющего сигнала, изменяющийся по заданному закону. Максимальная частота управляющего кода не должна превышать 100 кГц.

Служебная часть каждого из разработанных модулей содержит либо только дешифратор команд, либо дешифратор команд вместе с сервисным регистром. Дешифратор проводит дешифрацию команд NAF, используемых в модуле. Сервисный регистр содержит два триггера управления, два триггера запросов, которые могут возникать в модулях по различным причинам, два триггера масок запросов и триггеры статуса. В сервисный регистр информация заносится от магистрали по следующим шинам записи: W2, W3 — триггеры управления; W5—W7 — триггеры статуса; W9, W10 — триггеры запросов; W13, W14 — маска запросов. Для чтения сервисного регистра использованы шины R с соответствующими номерами.

В таблице приведены команды КАМАК, применяемые в разработанных модулях.

На рис. 2 показана стойка КАМАК с крейтом, содержащим специальные электронные модули и модули общего применения, ЭКВМ «Электроника ТЗ-16М», а также ряд вспомогательных устройств. Представленные на рисунке модули использованы в прецизионном многоградационном лазерном фотопостроителе, в прецизионном фотограмметрическом автомате «Зенит-2» и голограммном запоминающем устройстве ГЗУ-2, управляемых от ЭКВМ ТЗ-16М, ЭВМ ЕС-1010 и ЭВМ М-400 соответственно. Испытания модулей в перечисленных системах показали их высокую точность и надежность в работе.

На рис. 3, а изображена фотомаска, изготовленная на фотограмметрическом автомате «Зенит-2». Для записи фотомаски были использованы модули адаптера, реверсивного счетчика, управления электродвигателем (по одному на каждую из координат X и Y), а также число-импульсный умножитель, реверсивный делитель числа импульсов и модуль управления модулятором лазера.

Точки маски наносятся строками, параллельными оси X, при непрерывном движении каретки с фотоносителем с постоянной скоростью вдоль оси X в обе стороны. Для этого модули управления электродвигателями устанавливаются по координате X в режим перемещения ка-

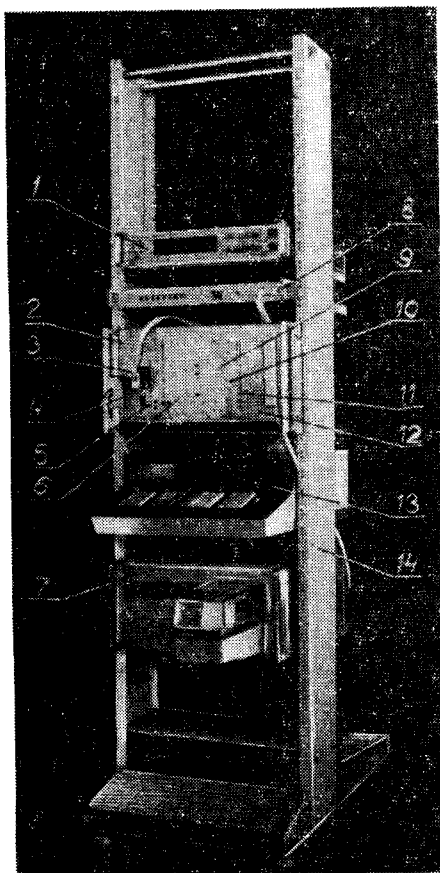


Рис. 2. Общий вид стойки КАМАК с электронными блоками для лазерного фотопостроителя:

1 — цифровой термометр, 2 — интерфейс для цифрового печатающего устройства, 3 — преобразователь двоичного кода в двоично-десятичный, 4 — интерфейс для цифрового дисплея, 5 — реверсивный счетчик, 6 — модуль управления электродвигателем, 7 — цифровое печатающее устройство, 8 — цифровой дисплей, 9 — модуль управления модулятором лазера, 10 — цифроаналоговый преобразователь, 11 — индикатор магистрали, 12 — крейт-контроллер к ЭКВМ «Электроника ТЗ-16М», 13 — ЭКВМ «Электроника ТЗ-16М», 14 — стойка КАМАК.

	A(9)F(23) A(9)F(1) A(0)F(8)	W13, W14=1 W9, W10=1 W13, W14=1 — —	установка маски запросов 1, 2 Селективное гашение СР: гашение запросов 1, 2, гашение масок запросов 1, 2 Чтение (СР): R9, R10 — запросы 1, 2, R13, R14 — маски запросов 1, 2 Чтение запроса с шины Q
Число-импульсный умножитель	A(0)F(16)	W1—W24	Запись в РД
Реверсивный счетчик	A(0)F(9) A(0)F(16) A(0)F(0)	— W1—W24 —	Гашение РС Запись в РС по S1, в РД по S2 Чтение РС
Реверсивный делитель	A(0)F(16)	W1—W16	Запись в РД
Модуль управления электродвигателем	A(0)F(9) A(0)F(16) A(0)F(0) A(1)F(25) A(1)F(24) A(2)F(16) A(9)F(19)  A(9)F(23)  A(9)F(1)  A(0)F(8)	— W1—W24 — — — W1—W10  W2=1 W3=1 W9, W10=1 W13, W14=1  W2=1 W3=1 W9, W10=1 W13, W14=1 — —	Гашение РС Запись в РС Чтение РС Пуск Стоп Запись в РД ЦАП Селективная установка СР: автономное управление, постоянная скорость, установка запросов 1, 2, установка маски запросов 1, 2 Селективное гашение СР: управление от ЭВМ, позиционирование, гашение запросов 1, 2, гашение масок запросов 1, 2 Чтение СР: R2—ЭВМ/АВТО, R3 — позиционирование/постоянная скорость, R5 — ON/OFF. R6, R7 — реперы 1, 2, R9, R10 — запросы 1, 2, R13, R14 — маски запросов 1, 2 Чтение запроса с шины Q
Модуль управления модулятором лазера	A(0)F(16) A(4)F(16)	W1 — W10 W1	Запись в счетчик ЦАП Запись в РУ

ретки с постоянной скоростью, а по координате Y — в режим позиционирования. Знак кода, записываемого в реверсивный счетчик модуля управления электродвигателем, определяет направление движения каретки, а его величина — величину скорости. Шаг маски по координате X задается кодом, заносимым в регистр данных управляемого делителя числа импульсов.

При движении каретки с фотоносителем вдоль строки в направлении оси X через заданные приращения длины, формируемые число-импульсным умножителем и управляемые делителем числа импульсов, про-

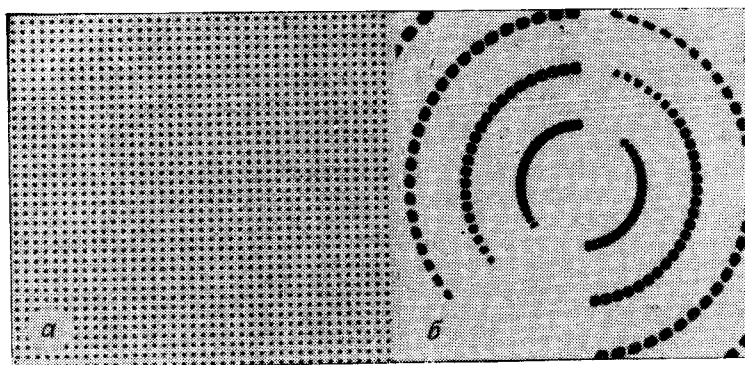


Рис. 3. Изображения, изготовленные на лазерных фотопостроителях:

*a* — фрагмент фотомаски из  $100 \times 100$  элементов; *b* — тестовые дорожки, записанные на стеклообразных халькогенидных пленках.

водится импульсное включение лазера, интенсивность которого определяет ЭВМ. После экспозиции строки в одном направлении каретка перемещается вдоль оси  $Y$  на шаг, определяемый кодом, заносимым в реверсивный счетчик  $Y$  модуля управления электродвигателем, и начинается нанесение элементов маски при движении каретки в обратном направлении. После достижения исходной координаты по оси  $X$ , вывода на новую строку и смены знака направления движения весь цикл изготовления фотомаски повторяется.

Фотомаска, фрагмент которой изображен на рис. 3, *a*, содержит  $100 \times 100$  элементов. Диаметр каждого из элементов равен  $100 \text{ мкм}$ . Шаг решетки по координатам  $X$ ,  $Y$   $130 \text{ мкм}$ . Максимальная абсолютная погрешность нанесения каждого из элементов по обеим координатам не превышает  $0,5 \text{ мкм}$ .

Благодаря тому что запись маски элементов проводится без остановки на время экспозиции, общее время изготовления такой маски не превышает  $10 \text{ мин}$ .

На рис. 3, *b* показаны тестовые дорожки на стеклообразных халькогенидных пленках, полученные на лазерном фотопостроителе, управляемом от ЭКВМ ТЗ-16М. Запись тестовых дорожек осуществляется аналогично записи элементов фотомаски с той лишь разницей, что на любой из строк, представляющих собой концентрические окружности, проводится линейное изменение управляющего кода при каждом включении лазера. Ширина строки равна  $10 \text{ мкм}$ , абсолютная погрешность нанесения каждой из строк не превышает  $0,32 \text{ мкм}$ .

Приведенные примеры показывают, что разработанные модули могут найти широкое применение в автоматизированных измерительных системах, в установках для синтеза киноформных элементов, производства фотошаблонов интегральных схем, в контрольно-измерительных установках, используемых при производстве памяти ЭВМ на магнитных дисках емкостью свыше  $100 \text{ Мбайт}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нестерихин Ю. Е. Оптоэлектронные системы и автоматизация исследований.— Автoметрия, 1977, № 5, с. 7—12.
2. Бурый Л. В., Коронкевич В. П., Нестерихин Ю. Е. и др. Прецизионный фотограмметрический автомат.— Автoметрия, 1974, № 4, с. 83—89.
3. Алькаев М. И., Клисторин И. Ф., Курочкин В. В., Щербаченко А. М. Система на основе малой ЭВМ для измерения перемещений с помощью лазерных интерферометров.— Автoметрия, 1973, № 3, с. 52—59.

4. Ведерников В. М., Петрашевич Л. А., Тарасов Г. Г. и др. Измерительные системы с лазерными датчиками на основе программируемых ЭКВМ типа «Электроника-70». — Автометрия, 1976, № 3, с. 47—53.
5. Щербаченко А. М., Юрлов Ю. И. Контроллер для связи ЭКВМ «Электроника ТЗ-16» с крейтом КАМАК. — В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. (Материалы Всесоюз. конф.) Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1975.
6. Алькаев М. И., Ведерников В. М., Щербаченко А. М. Программно-управляемые модули интерференционной координатно-измерительной системы фотограмметрического автомата «Зенит». — Автометрия, 1977, № 3, с. 24—32.
7. Ведерников В. М., Кириянов В. П., Щербаченко А. М. Методы уменьшения погрешности умножения в число-импульсных множительных устройствах лазерных измерителей перемещений. — Автометрия, 1976, № 5, с. 87—91.
8. Теллер Дж., Пестель М. П. Анализ и расчет нелинейных систем автоматического управления. М.—Л., Энергия, 1964, с. 352—374.

*Поступила в редакцию 3 августа 1979 г.*

---