

24. Васильев А. А., Одинокоев С. Б., Парфенов А. В., Якимович А. П. Оптический операционный усилитель для обработки изображений // II Всесоюз. конф. по оптической обработке информации: Тез. докл.—Фрунзе: Илим, 1990.
25. А. с. 1444889 СССР. Бистабильное устройство для хранения и обработки изображений / В. Н. Дубчак, В. Г. Красиленко, Н. Г. Яцковская.—Опубл. 15.12.88, Бюл. № 46.
26. А. с. 1527670 СССР. Способ записи изображения / В. П. Кожемяко, В. А. Подорожнюк, С. Н. Белан и др.—Опубл. 07.12.89, Бюл. № 45.
27. Положительное решение на заявку 4498330/24. Устройство для обработки изображений / В. П. Кожемяко, В. Г. Красиленко, В. А. Подорожнюк и др.—Принято 19.04.89.
28. Радиозлектроника за рубежом. Обзоры.—М.: НИИЭИР, 1989.—Вып. 6(38).
29. Баранов Ю. Л., Круглов И. И. Полупроводниковые приборы со структурой кремний на изоляторе: состояние и перспективы изготовления.—М.: ЦНИИ «Электроника», 1989.

*Поступила в редакцию 18 сентября 1990 г.*

УДК 681.327 : 681.7

А. А. Вербовецкий, И. А. Шилов

(Москва)

### СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕЖПРОЦЕССОРНОЙ СВЯЗИ И КОММУТАЦИИ ДЛЯ СУПЕРЭВМ

Предложены структурные, схемотехнические и конструктивные решения построения пассивных систем межпроцессорной связи и коммутации (СМСК) на основе волоконной оптики для суперЭВМ. Рассмотрены варианты как одноволновых систем, так и систем со спектральным уплотнением информации, предназначенных для коммутации большого числа центральных процессоров (ЦП) и запоминающих устройств (ЗУ). Произведена оценка основного параметра таких систем, которая, в частности, показывает, что СМСК со спектральным уплотнением информации может одновременно и независимо коммутировать по принципу «каждый с каждым» порядка  $10^4$  ЦП с  $10^4$  ЗУ при скорости передачи данных порядка 1000 Мбит/с. Приведена конструкция построения компактной одноволновой СМСК.

**Введение.** Связь и коммутация — области оптоэлектроники, которые наиболее перспективны и близки к внедрению в суперЭВМ, так как их реализация в наименьшей степени требует новых технологий. В частности, обе эти области почти полностью могут быть обеспечены современным уровнем технологии оптических волокон, излучателей, приемников, а также существующей микроэлектронной технологией.

Действительно, уже в настоящее время в современных ЭВМ протяженные внешние связи выполняются в основном волоконно-оптическими. Однако длина связи для ЭВМ является величиной относительной, и для суперЭВМ ее мерой может служить такт синхронизации. При такте  $\sim 1$  нс связи длиной  $\sim 2$  м (задержка  $\sim 10$  нс) уже можно считать большими и рассматривать возможность применения оптики.

Еще одна предпосылка использования оптики при построении систем связи и коммутации (ССК) внутри ЭВМ — возможность создания высокоплотного многоконтактного оптического разъема. Действительно, в настоящее время существуют определенные трудности в реализации электрического многоконтактного ( $\sim 1000$ ) СВЧ-разъема с высокой плотностью контактов  $\sim 1\text{мм}^{-2}$  (современный уровень  $\sim 0,1\text{мм}^{-2}$ ) для ячеек (модулей) ЭВМ.

Вопросам возможности построения волоконно-оптических многоканальных коммутаторов посвящен ряд работ [1—7]. Однако в большинстве из них для построения таких коммутаторов используются матрицы активных опто-

электронных переключателей, практическая реализация которых вызывает в настоящее время значительные трудности.

В данной работе предложены структурные, схемотехнические и конструктивные решения построения пассивных волоконно-оптических систем межпроцессорной связи и коммутации (СМСК), как одноволновых, так и со спектральным уплотнением информации, которые предназначены для работы в составе суперЭВМ для коммутации большого числа центральных процессоров (ЦП) с запоминающими устройствами (ЗУ) по принципу «каждый с каждым». Такая структура СМСК предназначена для использования в архитектурах многопроцессорных вычислительных комплексов (МВК) типа «Эльбрус», но может быть использована и в архитектурах типа MIMD.

Оптическая система пассивной связи с регенераторами. Предположим, что  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, N$ ) центральных процессоров необходимо коммутировать с  $k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, K$ ) запоминающими устройствами. При этом каждый ЦП может обратиться к любому одному, группе или ко всем  $K$  ЗУ одновременно. Кроме того, все  $N$  процессоров могут одновременно обратиться к одному, подгруппе или ко всей группе  $K$  запоминающих устройств.

Предположим, что во всех ЦП используются одинаковые группы излучателей (лазерных диодов — ЛД), работающие на одной и той же длине волны. При этом каждая группа содержит излучатели в количестве, равном числу  $p$  ( $p = 1, 2, 3, \dots, s$ , а  $s$  — максимальная разрядность передаваемого слова) разрядов передаваемого слова, а в каждом ЗУ располагаются группы фотоприемников в количестве, равном произведению числа разрядов слова  $p$  на число ЦП  $N$ ; т. е.  $p \times N$ .

Оптическая схема пассивной одноволновой СМСК представлена на рис. 1 (где  $a$  и  $b$  — ортогональные проекции; 1 — центральные процессоры; 2 — группа излучателей; 3, 5, 7, 9 — группы световодов; 4, 8 — группы световодных разветвителей; 6 — блоки регенераторов; 10 — матрица фотоприемников; 11 — запоминающие устройства). В этой схеме ЗУ разбиты на  $r$  групп по  $m$  устройств в каждой. Каждой  $r$ -й группе ЗУ соответствует блок регенераторов  $b$ , содержащий  $n$  регенераторов, в которых сигнал восстанавливается и усиливается до требуемой величины.

К каждой  $r$ -й группе регенераторов подключаются по одному выходу от каждого разветвителя всех  $n$  ЦП. Каждый выход  $r$ -го блока регенераторов подключается через разветвитель  $8$  ко всем  $m$  ЗУ соответствующей  $r$ -й группы.

Оценим общее количество ЗУ, которое может коммутировать данная схема, из энергетических соображений, полагая, что  $P_n = P_{pr}$  и  $r = m$ , где  $P_n$  — световая мощность лазерного диода;  $P_{pr}$  — световая мощность на выходе регенератора. Тогда

$$K = [P_n(1 - \rho_0)(1 - \rho_1)^v \times (1 - \rho_2) / P_0 f \mu]^2, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — потери при вводе излучения ЛД в волокно;  $\rho_1$  — потери в каждом оптическом разъеме;  $v$  — число разъемов в одном каскаде;  $\rho_2$  — потери в разветвителе и волокне;  $P_0$  — минимальная мощность на входе фотоприемника, обеспечивающая достаточно низкий коэффициент ошибок [нВт/(Мбит/с)];  $f$  — скорость передачи информации [Мбит/с];  $\mu$  — системный запас по мощности.

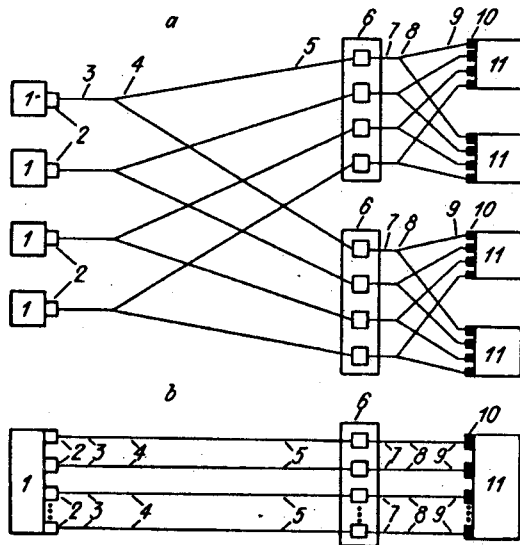


Рис. 1

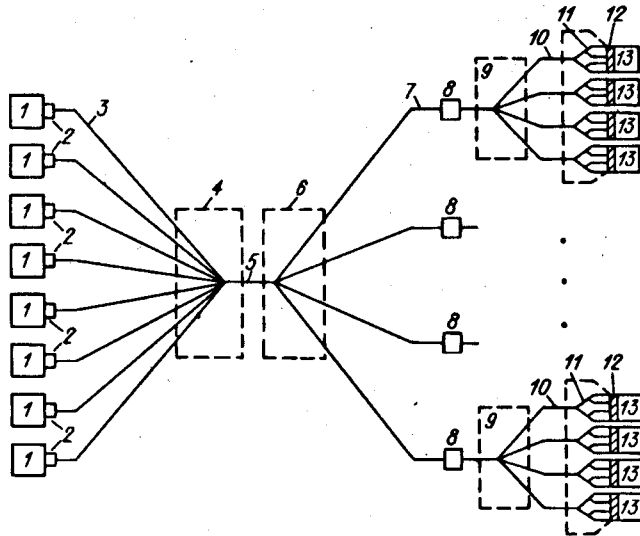


Рис. 2

Полагая  $P_n = 1$  мВт;  $\rho_0 = 0,5$ ;  $\rho_1 = 0,2$ ;  $\nu = 2$ ;  $\rho_2 = 0,1$ ;  $P_0 = 10$  нВт/(Мбит/с);  $f = 10^3$  Мбит/с;  $\mu = 10$ , получим  $K \approx 700$ .

Таким образом, данная схема позволяет коммутировать до 700 ЦП с 700 ЗУ при скорости передачи данных порядка 1000 Мбит/с.

Оптические системы пассивной связи со спектральным уплотнением. Оптическая схема СМСК со спектральным уплотнением представлена на рис. 2, где 1 — центральные процессоры; 2 — группы спектральных излучателей; 3, 7, 10 — группы световодов; 4 — группы световодных мультиплексоров; 5 — группа спектральных смесителей; 6, 9 — группа световодных демультиплексоров; 8 — группы регенераторов; 11 — группы спектральных демультиплексоров; 12 — матрица фотоприемников; 13 — запонирующее устройство. В отличие от предыдущей схемы (см. рис. 1) в данной схеме  $n$ -я группа излучателей 2 передает информацию на длине волны  $\lambda_n$  оптического сигнала, отличающейся от длин волн оптических сигналов, на которых передается информация остальными  $(n - 1)$ -ми процессорами.

Оптические сигналы одноименных  $p$ -х разрядов всех  $n$  информационных слов объединяются световодным мультиплексором 4 в единый  $n$ -цветный сигнал. Спектральные компоненты этого  $n$ -цветного оптического сигнала перемешиваются в спектральном смесителе 5 и световодным демультиплексором 6 размножаются на число  $r$  (где  $r = 2, 3, 4, \dots, K/2$ ) групп регенераторов 8.

Многоцветный оптический сигнал от каждого  $r$ -го регенератора группы 8 поступает на  $r$ -й световодный демультиплексор группы 9, который размножает его на число  $q$  (где  $q = 2, 3, 4, \dots, (K - 1)$ ) ЗУ в  $r$ -й подгруппе устройств 13. С каждого  $q$ -го выхода каждого  $r$ -го демультиплексора 9 многоцветный оптический сигнал поступает на  $q$ -й спектральный демультиплексор 11  $r$ -й группы ЗУ 13. Этот демультиплексор группы 11 направляет каждую  $n$ -ю спектральную составляющую многоцветного светового пучка на  $p$ -й фотоприемник  $n$ -й группы (линейки) матрицы 12 фотоприемников  $q$ -го запонирующего устройства  $r$ -й подгруппы ЗУ 13.

Данная схема СМСК по сравнению со схемой, представленной на рис. 1, может коммутировать примерно то же максимальное число устройств, однако содержит меньшее количество связей и разъемов и поэтому может быть практически выполнена более компактной и надежной.

Существенно увеличить количество коммутируемых устройств позволяет схема СМСК, изображенная на рис. 3, где 1 — центральные процессоры; 2 — группы спектральных излучателей; 3 — блоки групп спектральных излучателей; 4, 8, 11, 14 — группы световодов; 5 — группы световодных мультиплексоров; 6 — группы спектральных смесителей; 7, 10, 13 — группы световодных

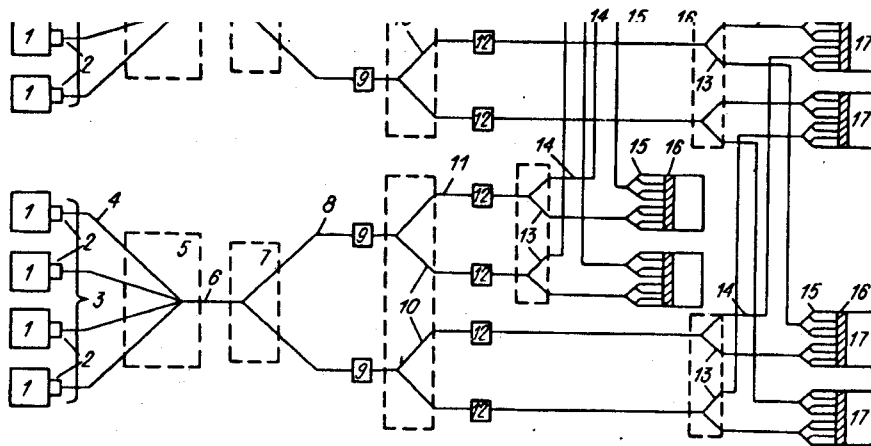


Рис. 3

демультиплексоров; 9, 12 — группы регенераторов; 15 — группы спектральных демультиплексоров; 16 — матрицы фотоприемников; 17 — запоминающие устройства.

В этой схеме все ЦП 1 разбиты на  $m$  (где  $m = 1, 2, 3, \dots, M$ ) блоков 3, каждый из которых содержит по  $n$  процессоров. При этом  $n$ -я группа 2 излучателей каждого  $m$ -го блока передает информацию оптическими сигналами на длине волны  $\lambda_m$ , отличающейся от длин волн оптических сигналов, на которых передается информация остальными  $(n - 1)$ -ми процессорами 1 каждого блока 3. В каждом ЗУ 17 располагается матрица фотоприемников 16, содержащая  $(N + M)$  групп (линеек) фотоприемников по  $p$  фотоприемников в каждой, т. е. всего  $p \times (N + M)$  фотоприемников. Данная схема СМСК (см. рис. 3) может увеличить число коммутируемых устройств в  $M$  раз. Так, если  $M = 10$ , то число коммутируемых устройств может приближаться к  $10^4$  ЦП и  $10^4$  ЗУ при скорости передачи данных 1000 Мбит/с.

Оптическая система одноволновой многоканальной связи. Схема такой системы показана на рис. 4 (1—1... 1— $n$  — блоки лазерных излучателей; 2—1... 2— $m$  — группы лазерных излучателей; 3—1... 3— $m$  — входные электрические шины; 4—1... 4— $n$  — блоки световодных разветвителей; 5—1... 5— $m$  — группы световодных разветвителей; 6—1... 6— $(m \times n \times r)$  — группы световодов; 7—1... 7— $K$  — матрицы фотоприемников; 8—1... 8— $n$  — группы фотоприемников; 9—1... 9— $n$  — выходные электрические шины; 12—1... 12— $K$  — запоминающие устройства). От каждого  $n$ -го процессора 10 группа  $p$  электрических сигналов, отображающая информационное слово (возможно, с временным уплотнением), поступает на соответствующий  $n$ -й блок электрических шин 3—1... 3— $m$  (где  $m = 2, 3, 4, \dots, K/2$ ), который размножает каждый электрический сигнал на число сигналов, равное числу  $m$  групп 2—1... 2— $m$  лазерных излучателей в  $n$ -м блоке. С каждой  $m$ -й шины 3  $p$  электрических сигналов поступают на  $m$ -ю группу 2 лазерных излучателей, и при этом каждый  $p$ -й электрический сигнал поступает на соответствующий  $p$ -й лазерный излучатель.

Оптические сигналы от каждой  $m$ -й группы 2 лазерных излучателей  $n$ -го блока 1 поступают на соответствующий  $m$ -й световодный разветвитель 5  $n$ -го блока 4, который размножает его на число оптических сигналов, равное числу  $r$  ( $r = 2, 3, 4, \dots, K/2$ ) запоминающих устройств 12, с которыми устанавливает

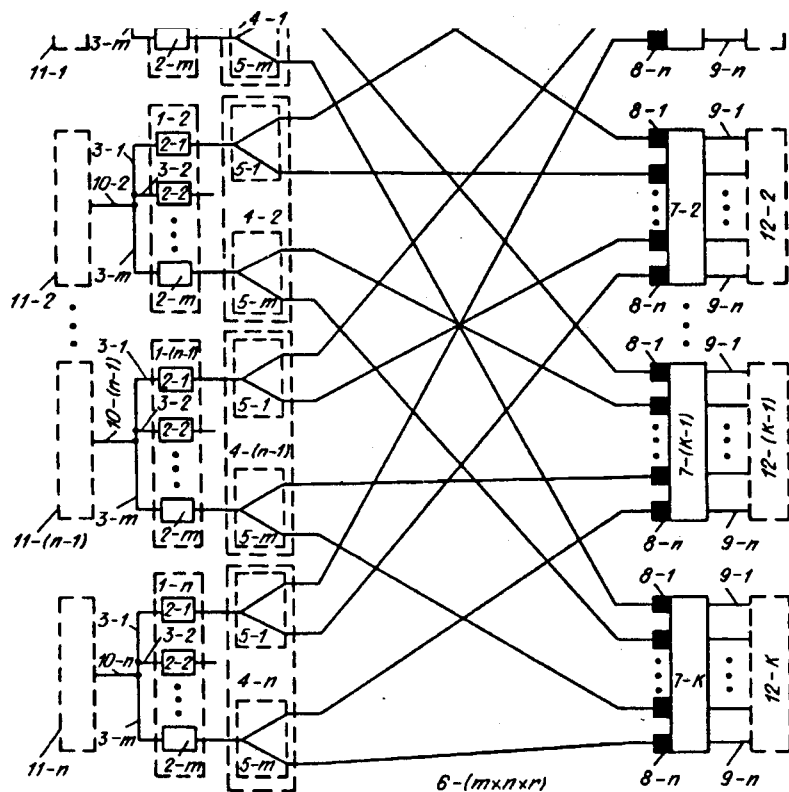


Рис. 4

связь данная группа 5 разветвителей. С группы  $r$ -х выходов каждого  $m$ -го разветвителя 5  $n$ -го блока 4  $r$  оптических сигналов через соответствующую группу световодов 6 поступают на соответствующую  $n$ -ю группу 8 фотоприемников  $r$ -го блока 7, преобразующую оптические сигналы в электрические, которые и поступают в соответствующее запоминающее устройство 12.

Конструктивное выполнение оптической СМК приведено на рис. 5. Эта конструкция показана для случая коммутирования одинакового количества центральных процессоров и запоминающих устройств. Коммутационные платы 15 и 16 располагаются вокруг цилиндрического световодного распределителя 14, чередуясь через одну. Стыковка плат 15 и 16 с цилиндром 14 осуществляется с помощью многоконтактных оптических разъемов, причем его наконечники на цилиндре 14 выполнены жесткими, а на платах — плавающими. Для повышения точности стыковки диски 13 в цилиндре 14 разбиты на группы, между которыми располагаются фиксирующие диски (без световодов), имеющие направля-

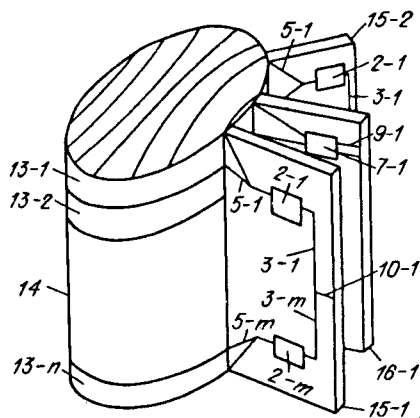


Рис. 5

ющие отверстия. Соответствующие этим группам группы плавающих накопителей на платах 15 и 16 снабжены направляющими штырями для предварительной фиксации на фиксирующих дисках. При этом распределитель 14 выполнен в виде набора одинаковых дисковых световодных распределителей 13, каждый последующий из которых повернут относительно предыдущего на одну позицию.

Для обеспечения прямой и обратной связей устройств 11 и 12 используются две описанные СМСК. При этом в первой СМСК входные шины 10-1 ... 10-n подключены к выходным шинам центральных процессоров 11-1 ... 11-n, а выходные шины 9-1 ... 9-nK соединены с входными шинами запоминающих устройств 12-1 ... 12-K. Входные шины 10-1 ... 10-n 2-й СМСК подключены к выходным шинам запоминающих устройств, а выходные шины 9-1 ... 9-nK соединены с соответствующими входными шинами центральных процессоров 11-1 ... 11-n. Следует отметить, что конструктивно обе СМСК могут быть объединены, т. е. могут быть использованы единые цилиндр 14 и платы 15 и 16.

Так, например, если СМСК предназначена для коммутирования 64 ЦП с 64 ЗУ, то практически цилиндрический световодный распределитель может состоять из 64 одинаковых дисковых световодных распределителей. Между каждой группой из 8 дисков, а также сверху и снизу цилиндра располагаются фиксирующие диски. В этом случае общие габаритные размеры системы вместе с пристыкованными коммутационными платами могут составить ~ 70 см в диаметре при высоте ~ 70 см.

Таким образом, такая конструкция позволяет создать довольно компактную, надежную и удобную в эксплуатации СМСК для суперЭВМ.

Следует отметить, что если на цилиндрическом световодном распределителе разместить вместо световодов 6 разветвители 5, то можно существенно уменьшить количество необходимых дисков 13, разъемов на дисках и платах 15 и 16, а следовательно, и общие габариты системы, т. е. можно сделать систему более надежной и компактной.

Оптоэлектронная схема гибридной СМСК. Схема гибридной СМСК изображена на рис. 6, а. Так как в современных ЭВМ такт работы центрального процессора обычно не меньше 4 нс, а частота работы лазерных диодов может достигать 2 ГГц, то в СМСК целесообразно применять временное уплотнение информации. Предположим, что для передачи полноразрядного информационного слова между процессором и запоминающим устройством используют: ( $p - 1$ )-информационный световод + один световод для передачи синхросигналов (синхросветовод или световодная синхрошина) и один световод для передачи адреса  $k$ -го запоминающего устройства, с которым необходимо установить связь (адресный световод или световодная адресная шина б). По информационным световодам передается информация (каждый такт без дополнительных временных интервалов), по световодной синхрошине — синхримпульсы, а по световодной адресной шине — маркерный импульс (с необходимым упреждением). Маркерный импульс обозначает начало информационного блока, за которым следует  $r$  ( $r = 2, 3, 4, \dots$ ) импульсов, отображающих адрес запоминающего устройства, в которое должен передаваться данный информационный блок слов.

Поэтому в данной оптоэлектронной СМСК каждый информационный канал состоит из  $p$  световодов, а всего на входе имеется ( $p \times N$ ) входных световодов + адресная шина, на выходе —  $p \times K$  выходных световодов.

От каждого  $n$ -го процессора группа  $p$  оптических сигналов поступает на соответствующую  $n$ -ю группу входных световодов 1. При этом одноименные  $p$ -е оптические сигналы от всех  $n$ -х групп входов 1 следуют по соответствующим входным световодам 2 на одноименный один  $p$ -й оптоэлектронный коммутационный блок 3. На этот же блок поступают по адресной шине управляющие сигналы, в соответствии с которыми он коммутрует входные информационные сигналы. При этом одни и те же управляющие сигналы поступают на все коммутационные блоки 3, так как все разряды каждого слова

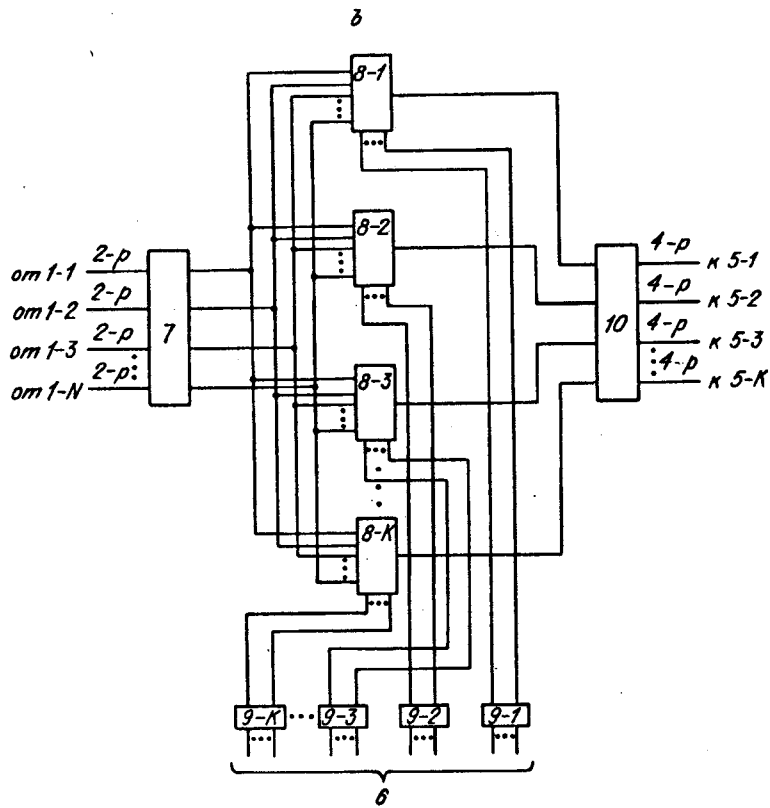
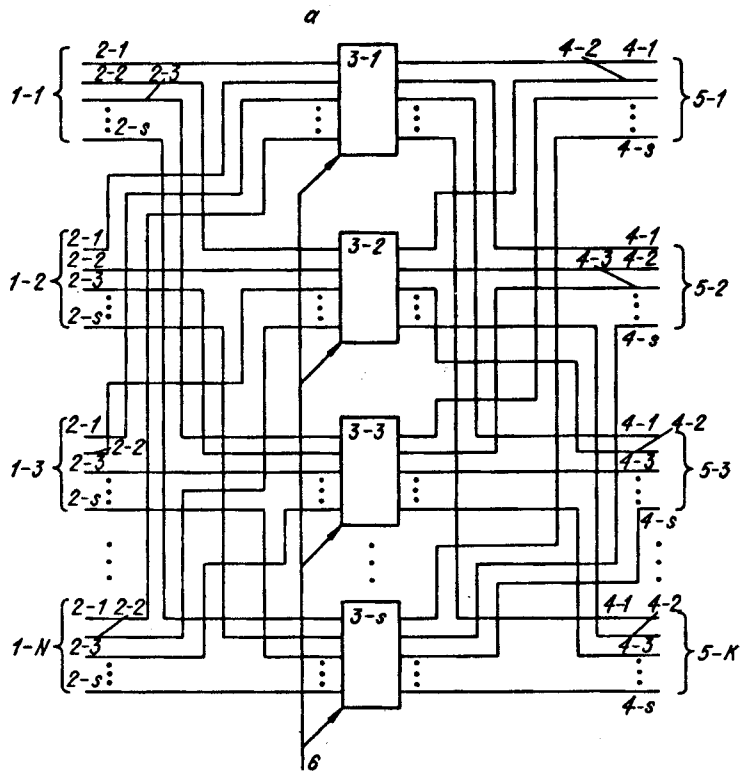


Рис. 6

должны коммутироваться одинаково. Таким образом, одновременно на одноименных выходах всех коммутационных блоков появляются соответствующие разряды одного и того же информационного слова. Оптические сигналы, отображающие эти разряды, следуют по соответствующим выходным световодам 4, объединяются в единую группу, которая отображает на соответствующем  $k$ -м выходе 5 соответствующее информационное слово.

Схема оптоэлектронного коммутационного блока показана на рис. 6 б. Конструктивно оптоэлектронный коммутатор монтируется на плате, а световоды 2 и 4 оконцованы многоконтактными оптическими наконечниками для стыковки на соответствующих входах 1 и 5 с внешними схемами и внешними волоконно-оптическими кабелями межпроцессорной связи.

Обратная передача информации из запоминающих устройств в центральные процессоры производится по второму каналу, который работает аналогично первому, описанному выше, но в обратном направлении. Конструктивно оба канала могут быть выполнены на одной плате.

Следует отметить, что в данной схеме переключение устройств осуществляется электронными элементами, которые и будут ограничивать быстродействие и максимальное число коммутируемых устройств. Однако из рассмотренных в данной работе систем СМСК эта система наиболее близка к реализации.

**Заключение.** В данной работе рассмотрены структурные, схемотехнические и конструктивные варианты построения систем межпроцессорной связи и коммутации для суперЭВМ на основе волоконной оптики. Произведена оценка основного параметра этих систем, которая показывает, что СМСК со спектральным уплотнением может одновременно коммутировать до  $10^4$  процессоров с  $10^4$  запоминающими устройствами по принципу «каждый с каждым» при скорости передачи данных  $\sim 1000$  Мбит/с. В зависимости от назначения, технических требований к СМСК суперЭВМ, а также имеющейся компонентной базы для ее реализации может быть выбрана наиболее подходящая схема СМСК из предложенных в данной работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Degan J. J., Luderer W. R., Valuya A. K. Fast packet technology for future switches // AT&T Techn. J.—1989.—N 2.
2. Goodman M. S. Multiwavelength networks and new approaches to packet switching // IEEE Commun. Mag.—1989.—N 10.
3. Kobrinski H., Cheung K. Wavelength-tunable optical filters: applications and technologies // Ibid.
4. Arthurs E., Cooper J. M., Goodman M. S. et al. Multiwavelength optical crossconnect for parallel-processing computers // Electron. Lett.—1988.—28, N 2.
5. Kaminow I. P. Non-coherent photonic frequency-multiplexed access networks // IEEE Network.—1989.—3, N 2.
6. Lea C. Crossover minimization in directional-coupled-based photonic switching systems // IEEE Trans. Commun.—1988.—36, N 3.
7. Вербовецкий А. А. Принципы создания и схемотехнические вопросы построения интегрально-оптических многоканальных ассоциативных корреляторов для вычислительных систем // Автометрия.—1991.—№ 5.

Поступила в редакцию 11 июля 1991 г.