

Д. т. н. А. И. КОРОБОВ, А. Е. ПЛЕХАНОВ,
к. т. н. Е. М. ТВЕРСКОЙ

Дата поступления в редакцию
26.09 1998 г. — 05.01 1999 г.
Оппонент к. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО

Россия, г. Москва, Московский гос. авиационный ин-т

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВАРИАНТА ГИС

Приведены основы методики выбора конструктивно-технологического варианта ГИС по критериям быстродействия и себестоимости.

The procedure bases of NIC constructional-technological selection according to high speed and selfcost are given.

В разработке современных радиоэлектронных средств (РЭС) особое место занимает проектирование изделий первого структурного уровня — микросборок (МСБ) и гибридных интегральных схем (ГИС). Наиболее ответственным этапом проектирования этих изделий является этап выбора конструктивно-технологического варианта (КТВ).

Такой выбор предполагает определение совокупности норм проектирования и способов изготовления унифицированной конструкции некоторого множества МСБ, обладающих сходными значениями удельных показателей качества (плотности монтажа, мощности рассеяния, быстродействия) и не отличающихся значительно по уровню интеграции, массе, габаритам и затратам на изготовление [1]. От качества выполнения этого этапа зависят как характеристики качества проектируемого изделия, так и себестоимость его изготовления.

Существующая практика выбора конструктивно-го исполнения и технологии путем сравнения разрабатываемого изделия с вариантом-аналогом имеет недостатки. Привязка к изделию-аналогу сужает возможности выбора (используется ограниченная база данных и относительные критерии выбора) и не стимулирует процесс накопления и систематизации соответствующей базы данных об изделиях конкретного КТВ.

Можно констатировать отсутствие комплексного, критериального подхода к выбору КТВ изделий РЭС, который основывался бы на использовании аналитических зависимостей показателей качества проектируемого изделия в целом и себестоимости его изготовления с характеристиками выбираемых компонентов и процессов сборки. Нет также целенаправленной систематизации данных, необходимых для проектирования изделий конкретного КТВ.

Поэтому целесообразно разработать методику выбора КТВ, основанную на использовании связи показателей качества с параметрами компонентов МСБ и процессов установки и электромонтажа используемой в ней элементной базы (ЭБ). Для МСБ, входящих в состав быстродействующих функциональных устройств, необходимо рассматривать связь характеристики быстродействия (времени формирования или преобразования сигнала изделием) с параметрами входящих в его состав компонентов.

Быстродействие МСБ зависит от времени формирования сигнала в применяемых ИС ($\tau_{ЭБ}$) и времени его задержки в электрических цепях (τ_3):

$$\tau_{МСБ} = \tau_{ЭБ} + \tau_3.$$

Величина $\tau_{ЭБ}$ определена при разработке электрической схемы изделия, поэтому для выбора КТВ необходимо определить τ_3 .

Среднее время задержки сигнала в сигнальной цепи МСБ определяется выражением [2]

$$\tau_{зср} = t_0 l + R_0 C_0 l^2 + R_{\text{вых}} C_0 l \quad (1)$$

или

$$\tau_{зср} = t_0 l + RC + R_{\text{вых}} C,$$

где t_0 — погонная задержка распространения сигнала в электрической цепи;

l — средняя длина сигнальной цепи;

$R_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление активного элемента ИС;

R, R_0, C, C_0 — полное и погонное значения сопротивления и емкости сигнальной цепи, соответственно.

Полная электрическая емкость сигнальной цепи складывается из нескольких составляющих, величины которых определяются конструктивным исполнением КП — коммутационной платы ($C_{\text{КП}}$) и применяемых ИС ($C_{\text{ВИС}}$):

$$C = C_{\text{КП}} + C_{\text{ВИС}}; \quad C_{\text{КП}} = C_1 + C_2, \quad (2)$$

где C_1 — емкость отдельно взятого проводника;

C_2 — емкость, образованная двумя близлежащими проводниками.

В случае расположения проводников в двух слоях в общую емкость сигнальной цепи может быть добавлена емкость их пересечений (C_3):

$$C_{\text{КП}} = C_1 + C_2 + C_3. \quad (3)$$

Значения емкостей C_1, C_2, C_3 определяются по формулам [2, 3]

$$C_1 \cong \frac{0,0241\epsilon l}{21\lg(4l/b)} \text{ пФ}; \quad (4)$$

$$C_2 = 4,5 \cdot 10^{-3} [1,56 + 0,41 \lg(b/a)] l (1 + \epsilon) \text{ пФ}; \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon \epsilon_0 b^2}{4\pi h} n, \quad (6)$$

где l и b — длина и ширина проводника;
 a — зазор между проводниками;
 d — толщина слоя металлизации;
 h — толщина диэлектрического покрытия;
 n — число пересечений;
 ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды;
 ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Для приближенных оценок при произвольном размещении ИС и ортогональной трассировке средняя длина проводника электрической цепи определяется линейными размерами монтажного поля (L) [2]:

$$l = L, L = (L_1 + L_2) / 2 \cong \sqrt{S_{\text{КП}}},$$

где $S_{\text{КП}}$ — площадь КП.

Но для оценки задержки распространения сигнала важно знать максимальную длину сигнальной цепи. Для приближенных оценок будем считать

$$l_{\text{max}} \leq 2\sqrt{S_{\text{КП}}}. \quad (7)$$

При выполнении условия

$$R_{\text{вых}} \gg R_0 l \quad (8)$$

вклад третьего слагаемого в формуле (1) в общую задержку сигнала значителен и $\tau_{\text{зср}}$ определяется, в основном, выходным сопротивлением элемента ИС и емкостью сигнальной цепи.

Время задержки сигнала в электрической цепи коммутационной платы может быть сравнено с быстроедействием ИС. Для уменьшения искажений сигнала в цепях МСБ $\tau_{\text{зср}}$ должно быть меньше времени формирования (преобразования) электрического сигнала БИС $\tau_{\text{ЭБ}}$, которое практически совпадает с длительностью фронта ($\tau_{\text{ф}}$).

Таким образом, критерий выбора коммутационной платы, не ухудшающей быстрогодействия ИС, выглядит следующим образом:

$$\tau_{\text{ф}} \geq \tau_{\text{зср}}. \quad (9)$$

Величина $\tau_{\text{зср}}$ определяет ограничение частотного диапазона МСБ, т. к. должно выполняться условие

$$f_{\text{в}} \cong 0,1 / \tau_{\text{зср}}, \quad (10)$$

где $f_{\text{в}}$ — верхняя частота рабочего диапазона МСБ.

Если несколько дополнить выражение (1), то возможна более точная оценка величины $\tau_{\text{зср}}$, учитывающая паразитные емкости выводов входной ($C_{\text{вх}}$) и выходной ($C_{\text{вых}}$) ИС, которые так же оказывают влияние на задержку сигнала:

$$\tau_{\text{зср}} = t_0 l + (R_0 l + R_{\text{вых}})(C_0 l + C_{\text{вых}} + n' C_{\text{вх}}), \quad (11)$$

где n' — максимальная нагрузочная способность элемента (коэффициент разветвления по выходу).

Значения параметров $C_{\text{вых}}$ и $n' C_{\text{вх}}$ приведены в справочной литературе. В ряде случаев их величины достаточно малы по сравнению с $C_0 l$, и при расчетах ими можно пренебречь. Так, например, при длине электрической цепи $l = 10$ см и $C_0 = 3,33$ пФ/см (сталь с эпоксидной смолой) паразитная емкость проводника КП $C_0 l = 33,3$ пФ, а паразитная емкость выводов ИС — ($C_{\text{вых}} + n' C_{\text{вх}}$) = $0,2 + 5 \cdot 0,2 = 1,2$ пФ ($C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} = 0,2$ пФ — емкость вывода корпуса для монтажа на поверхность).

Используя полученную связь (11) определим критерии выбора компонентов, составляющих МСБ.

Если в линии, характеризующейся временем распространения сигнала $t_{\text{л}}$, распространяется сигнал импульсной формы (дискретный сигнал) с длительностью фронта $\tau_{\text{ф}}$, то при $t_{\text{л}} > 0,1 \tau_{\text{ф}}$ линию принято считать электрически длинной и электрически короткой при $t_{\text{л}} < 0,1 \tau_{\text{ф}}$ [3]. Для МСБ целесообразно, чтобы линии электрической связи были электрически короткими.

Время распространения сигнала в линии определяется выражением

$$t_{\text{л}} = t_0 l.$$

Погонная задержка распространения сигнала в электрической цепи зависит от физических параметров среды:

$$t_0 = t_{\text{об}} \sqrt{\epsilon_{\text{эф}} \mu}; \quad \epsilon_{\text{эф}} = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2, \quad (12)$$

где $t_{\text{об}}$ — погонная задержка распространения электромагнитной волны в вакууме, $t_{\text{об}} \cong 3,3$ нс/м;

$\epsilon_{\text{эф}}$ — эффективное значение относительной диэлектрической проницаемости окружающей проводник среды с учетом ее неоднородности;

ϵ_1, ϵ_2 — значения относительной диэлектрической проницаемости граничных сред;

μ — относительная магнитная проницаемость среды, в немагнитной среде равная 1.

Обычно для электрических линий связи $\mu = 1$. В этом случае

$$t_{\text{л}} = t_{\text{об}} l \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} \quad (13)$$

или

$$t_{\text{об}} l \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} \leq 0,1 \tau_{\text{ф}}. \quad (14)$$

При заданных значениях $\tau_{\text{ф}}$ и l можно определить максимальное значение $\epsilon_{\text{эф}}$:

$$\epsilon_{\text{эф}} \leq \{0,1 \tau_{\text{ф}} / (t_{\text{об}} l)\}^2. \quad (15)$$

Величина $\epsilon_{\text{эф}}$ зависит от степени неоднородности среды, в которой располагается проводник. Если электромагнитное поле замыкается, в основном, через однородную среду (проводник окружен слоями диэлектрика одного типа), то

$$\epsilon_{\text{эф}} = \epsilon.$$

Если проводник расположен на границе твердого диэлектрика и воздуха (поверхность коммутационной платы, $\epsilon_1 = \epsilon, \epsilon_2 = 1$), то

$$\epsilon_{\text{эф}} = (\epsilon + 1) / 2.$$

Таким образом можно определить максимальное значение относительной диэлектрической проницаемости материала подложки:

• для одно- и двухуровневого исполнения КП

$$\epsilon_{\max} = 2\epsilon_{\text{эф}} - 1; \quad (16)$$

• для многослойной КП

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_{\text{эф}}. \quad (17)$$

Итак, для выполнения условия получения электрически коротких линий связи нужно выбирать коммутационные платы с таким материалом подложки, чтобы выполнялось условие

$$\epsilon \leq \epsilon_{\max}. \quad (18)$$

При передаче информации через сигнальную цепь протекает электрический ток, в результате чего напряжение на линии падает на величину ΔU , которая не должна превышать допустимого значения.

Например, для БИС серий ТТЛШ допустимое падение напряжения $\Delta U_{\text{доп}} = 0,4$ В и определяется как $\Delta U_{\text{доп}} = \min(\Delta U^0, \Delta U^1)$,

причем

$$\Delta U^0 = |U_{\text{вх.пор}}^0 - U_{\text{вых.мах}}^0|$$

или

$$\Delta U^1 = |U_{\text{вх.пор}}^1 - U_{\text{вых.мин}}^1|,$$

где $U_{\text{вх.пор}}^0, U_{\text{вх.пор}}^1$ — пороговое напряжение входного сигнала низкого и высокого уровней, соответственно;

$U_{\text{вых.мах}}^0$ — максимальное выходное напряжение низкого уровня;

$U_{\text{вых.мин}}^1$ — минимальное выходное напряжение высокого уровня.

При протекании через линию максимального тока ($I_{\text{мах}}$) и фиксированном значении $\Delta U_{\text{доп}}$ можно определить максимально допустимое сопротивление электрической цепи:

$$R_{\text{доп}} = \Delta U_{\text{доп}} / I_{\text{мах}}. \quad (19)$$

Следует отметить, что

$$R_{\text{доп}} = R_{\text{л}} + 2R_{\text{выв}},$$

где $R_{\text{л}}$ — сопротивление сигнальной цепи (проводника); $R_{\text{выв}}$ — сопротивление вывода БИС, зависящее от конструктивного исполнения ИС (см. табл. 1).

Как правило $R_{\text{л}} \gg R_{\text{выв}}$, и величиной $R_{\text{выв}}$ можно пренебречь.

При заданной длине линии можно выдвинуть требование к погонному сопротивлению проводников сигнальной цепи:

$$R_{0\text{доп}} = R_{\text{доп}} / l. \quad (20)$$

С учетом (19)

$$R_{0\text{доп}} = \Delta U_{\text{доп}} / (I_{\text{мах}} l). \quad (21)$$

Исходя из этого можно предъявить требование к погонному сопротивлению проводников КП:

$$R_0 \leq \Delta U_{\text{доп}} / (I_{\text{мах}} l). \quad (22)$$

Таблица 1

Паразитные параметры различных вариантов конструктивного исполнения ИС

Параметры	Число выводов	Корпус типа Dip	Корпус для поверхностного монтажа	Бескорпусная ИС на полиимидной основе
Индуктивность выводов, кГн	16	6,40	1,13	0,1
	28	14,77	1,80	> 0,26
	40	24,94	2,90	> 0,40
Межвыводная емкость, пФ	16	0,74	0,13	0,03
	28	1,48	0,19	0,04
	40	2,13	0,27	0,05
Сопротивление выводов, Ом	16	0,242	0,114	0,02
	28	0,319	0,139	0,04
	40	0,644	0,147	0,08

Таким образом, КП должна удовлетворять требованиям:

$$\epsilon \leq \epsilon_{\max}; R_0 \leq R_{0\text{доп}}. \quad (23)$$

Эти неравенства целесообразно использовать в качестве критериев выбора коммутационной платы для МСБ быстродействующих функциональных узлов. Полученные критерии необходимо дополнить, чтобы обеспечить требуемые значения показателей эффективности производства.

В условиях рыночной экономики интегральным показателем эффективности производства является прибыль. Прибыль от реализации одного изделия (П) есть разница между его ценой (Ц) и себестоимостью его изготовления (С):

$$P = C - S. \quad (24)$$

Цена определяется характеристиками качества изделия и условиями рынка (соотношение между спросом и предложением). Поскольку условия рынка не управляются разработчиком и изготовителем изделия, то его влияние на прибыль во многом определяется возможностью снижения себестоимости. Поэтому на всех этапах жизненного цикла микроэлектронной аппаратуры и составляющих ее изделий различного структурного уровня целесообразен экономический анализ, заключающийся в выявлении и применении в качестве факторов критериев, определяющих себестоимость.

Себестоимость МСБ можно рассчитать по формуле

$$C_{\text{МСБ}} = \frac{1}{P_2} \left[\frac{\sum_{i=1}^n C_i + C_M}{P_1} N + \sum_{j=1}^m C_{j\text{сб}} + \sum_{k=1}^r n_k C_{k\text{БИС}} \right], \quad (25)$$

где $\sum C_i, \sum C_{j\text{сб}}$ — стоимость процессов формирования пассивной (коммутационной) платы и процессов сборки, соответственно;

C_M — стоимость подложки ;

Таблица 2

Характеристики элементной базы

Серия БИС	Технология изготовления	Количество выводов	$\tau_{ф, нс}$	Потребляемая мощность, Вт	$U_{вых.min}^1$, В	$U_{вых.max}^0$, В	$I_{вх.max}^1$, мкА	$I_{вх.max}^0$, мкА	$U_{вх.пор.}^1$ (min), В	$U_{вх.пор.}^0$ (max), В	$I_{вых.max}^1$, мА	$I_{вых.max}^0$, мА
588ВР2	КМОП	24	30,0	0,01	4,10	0,4	1	1	3,7	0,8		
1804ИС2	ТТЛШ	48	6,0	2,00	2,40	0,5	50	2000	2	0,7		
1802ИМ1	ТТЛШ	48	47,0	1,35	2,40	0,5	50	1000	2	0,8		
1804ВР3	ТТЛШ	20	31,0	0,12	2,40	0,5	50	1400	2	0,7		
1802ВР6	ТТЛШ	42	55,0	1,35	2,40	0,5	60	1000	2	0,8		
589АП16	ТТЛШ	16	25,0	0,003	2,40	0,6	80	800	2	0,8		
589ИК01	ТТЛШ	40	45,0	1,20	2,40	0,5	50	600	2	0,8		
586ИК03	ТТЛШ	28	30,0	0,80	2,40	0,45	100	2000	2	0,8		
580ВА86	ТТЛШ	20	30,0	0,80	2,40	0,45	100	2000	2	0,8		
580ВА7	ТТЛШ	20	22,0	0,65	2,40	0,45	100	2000	2	0,8		
1800ВР1	ЭСЛ	64	3,0	4,60	-1,00	-1,6	340	0,5	-0,86	-1,9		
1800РП16	ЭСЛ	48	3,0	2,20	-1,00	-1,6	340	0,5	-0,86	-1,8		
588ВА1	ТТЛШ	28	100	0,002	4,30	0,4	1	1	3,9	0,8		
588ИР2	КМОП	28	80,0	0,002	4,10	0,4	0,4	1	1	3,7		0,6
1810 ВН59А	КМОП	28	300	0,43	2,40	0,45	1	1	2	0,8		
1500ИМ180	ЭСЛ	24	2,0	1,3	-1,0	-1,6	220	0,5	-0,9	-1,7		

Таблица 3

Параметры оснований коммутационных плат

Материал подложки	Технология	Количество слоев	R_0 , Ом/см	C_0 , пФ/см	ϵ , Ф/м	Размеры (max), мм	Стоимость, отн. ед.	Тепловое сопротивление, К·см ² /Вт
С41-1	ТНП	Два	1,0	1,25	7,5	48×60	1,0	
С48-8	“	“	1,0	0,98	5,5	48×60	1,0	
СТ50-1	“	“	1,0	1,13	7,0	48×60	1,0	
Плавленый кварц	“	“	1,0	0,73	3,8	50×50	10,0	
Al с эпоксидной смолой	“	“	1,0	1,08	4,0	100×100	0,06	
Анодированный Al	“	“	1,0	2,13	7,0	100×100	0,03	
Ti с анодированным слоем	“	“	1,0	2,13	7,0	100×100	1,2	
Сталь с эпоксидной смолой	“	Много	1,0	3,33	13,0	100×100	0,08	
Ковар с диэлектрическим покрытием	“	Два	1,0	1,25	4,6	100×100	0,1	
ПМ-1 на ситалле	ПИ	Много	0,01	0,64	3,5	100×250	10,0	
ПМ-1 на анодированном Al	“	“	0,01	1,27	3,5	100×250	100,0	
22ХС	ТЛП	“	1,5	1,92	10,3	100×100	3,0	
Глазурованная керамика	“	“	1,5	2,59	14,5	100×100	4,0	
Эмалированная сталь	“	“	1,5	3,65	11,0	48×60	0,01	
Бериллиевая керамика	“	“	1,5	1,53	8,0	48×60	10,0	
Нитроалюминиевая керамика	ТНП	Два	1,0	1,25	7,8	100×100	10,0	
Поликор	“	Один	1,0	1,80	10,5	48×60	6,0	

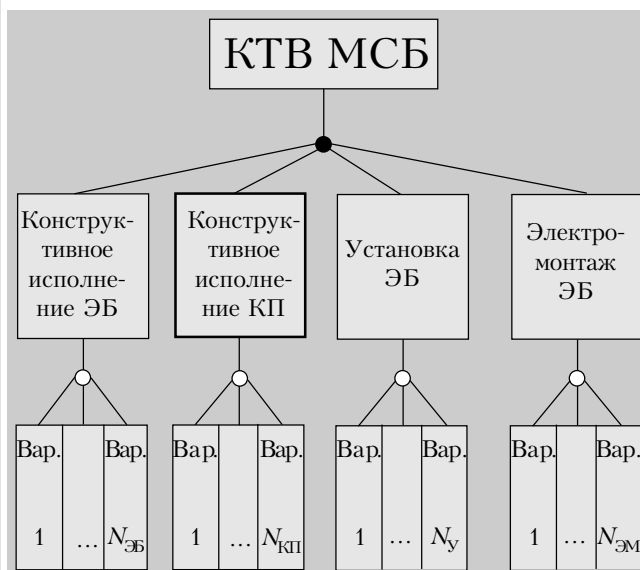
p_1, p_2 — коэффициенты выхода годных после изготовления КП из партии на подложке и после сборки, соответственно;
 N — число КП на подложке;
 $C_{k\text{БИС}}, n_{k\text{БИС}}$ — стоимость и число БИС k -го типа, соответственно;
 r — число типов БИС в данной МСБ.

Величина $C_{k\text{БИС}}$ состоит из стоимости кристалла $C'_{k\text{БИС}}$ и стоимости конструктивного оформления кристалла $C''_{k\text{БИС}}$.

Таким образом, факторами, изменяющими стоимость изготовления МСБ при выборе КТВ, являются:

$$p_1, p_2, \sum_{i=1}^n C_i, C_M, N, \sum_{j=1}^m C_{j\text{сб}}, C''_{k\text{БИС}}.$$

Часть из них является характеристиками КП ($p_1, \sum C_i, C_M, N$), другие ($\sum n_k, C''_{k\text{БИС}}$) характеризуют элементную базу. Параметры $\sum C_{j\text{сб}}$ являются характеристиками МСБ. Часть характеристик являются взаимосвязанными. Так, $\sum C_{j\text{сб}}$ взаимосвязана с $C''_{k\text{БИС}}$. Поэтому, чтобы производить оценку себестоимости МСБ при выборе КТВ необходима база данных, содержащая информацию об отмеченных выше факторах по каждому варианту.



Алгоритм выбора КТВ микросборки

Итак, для выбора КТВ микросборки быстродействующего функционального устройства должны быть применены критерии (23) и (25).

В качестве алгоритма выбора можно использовать иерархическую структуру «И–ИЛИ»-графа. На рисунке • — вершина «И», ◦ — вершина «ИЛИ». Линии, выходящие из вершины «И», обозначают действия, обязательные для исполнения в заданной последовательности, из вершины «ИЛИ» — вари-

анты конструктивного исполнения компонентов МСБ (элементной базы (ЭБ) и КП) и процессов их установки (У) и электромонтажа (ЭМ), из которых требуется выбрать один вариант, наиболее полно отвечающий критериям выбора.

Варианты для выбора конструктивного исполнения ЭБ, коммутационной платы, а также процессов установки и электромонтажа ЭБ должны быть представлены соответствующей базой данных. В табл. 1–3 в качестве примера приведены данные, позволяющие путем их перебора по критериям (23) и (25) в соответствии с описанным алгоритмом, производить выбор КТВ микросборок.

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют выбрать вариант конструктивного исполнения ИС (БИС) по критериям его влияния на время задержки сигнала в цепях коммутации.

В табл. 2 приведены характеристики элементной базы, предназначенные для расчета требуемого значения погонного сопротивления КП. (Эти данные относятся к корпусным БИС и, следовательно, их использование ограничивает применение изложенной методики выбора КТВ — только для ГИС, МСБ и функциональных устройств, выполненных на корпусных БИС. Для расширения методики следует определять задержку на емкость, вносимую корпусом, и вычесть эту величину из τ_{ϕ} , приведенного для соответствующей серии БИС в табл. 2.)

В табл. 3 приведены характеристики вариантов коммутационных плат (здесь ТНП — тонкопленочная технология, ТЛП — толстопленочная, ПИ — полиимидная).

Стоимость процесса изготовления КП по толстопленочной технологии составляет 1, по тонкопленочной — 3 относительных единицы (отн. ед.). Стоимость процесса сборки шариковых выводов — 1 отн. ед., ленточных носителей — 2 отн. ед., гибких выводов — 5 отн. ед.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Власов В. Е., Захаров В. П., Коробов А. И. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1987.
2. Файзулаев Б. Н., Дабкин В. А., Богданов Д. П. Быстродействие межсоединений СБИС // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронно-вычисл. техн. — 1985. — Вып. 7. — С. 79–83.
3. Николаев И. М., Филинюк Н. А. Интегральные микросхемы и основы их проектирования. — М.: Радио и связь, 1992.
4. Коледов Л. А. Технология конструирования микросхем, микропроцессоров и МСБ. — М.: Радио и связь, 1989.
5. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1986.