Повышение радиационной стойкости индустриальных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры

Олег Гобчанский, Виктор Попов, Юрий Николаев

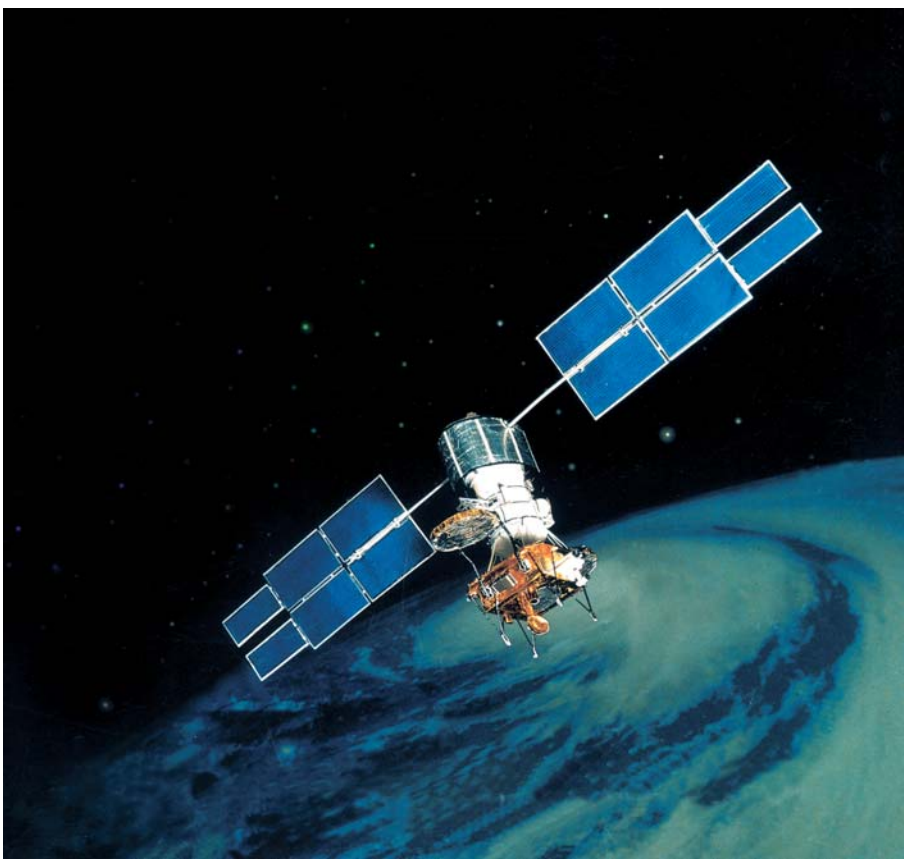
Рассматривается способ повышения радиационной стойкости, позволяющий использовать устройства индустриального назначения в составе бортовой аппаратуры космического аппарата. Приводятся результаты испытаний модулей MicroPC и некоторых ИМС, подтверждающие существенное увеличение предельной накопленной дозы радиации в выключенном состоянии. Предлагается использование периодического переключения режима (ППР) при эксплуатации бортовой аппаратуры.

Возможность применения индустриальных средств автоматики

По своим функциональным возможностям и ряду эксплуатационных параметров индустриальные средства автоматики: микроЭВМ, контроллеры, УСО, сетевые устройства — оказываются пригодными для решения многих задач в составе бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА). Их использование привлекательно тем, что позволяет существенно снизить стоимость БА. Препятствием к этому являются особые эксплуатационные требования, предъявляемые к аппаратуре КА, и, прежде всего, требования по обеспечению радиационной стойкости.

Радиационные условия в космосе

При эксплуатации бортовая аппаратура подвергается воздействию ионизирующих излучений (ИИ) заряженных частиц естественного радиационного поля Земли (ЕРПЗ), галактических и солнечных космических лучей (ГКЛ и СКЛ). ЕРПЗ образовано электронами и протонами, захваченными магнитосферой Земли, а ГКЛ и СКЛ — это потоки тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) — протонов, ядер химических элементов, ионов, обладающих относительно высокой энергией.

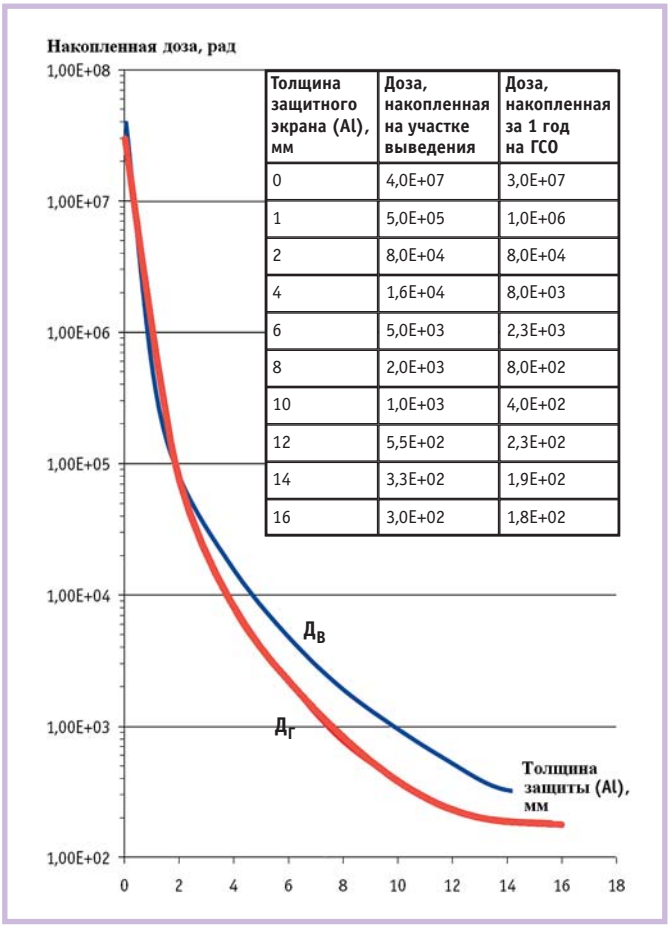


Радиационная стойкость аппаратуры определяет в основном её срок активного существования (САС) и вероятность безотказной работы.

Радиационные условия на разных орбитах существенно различаются.

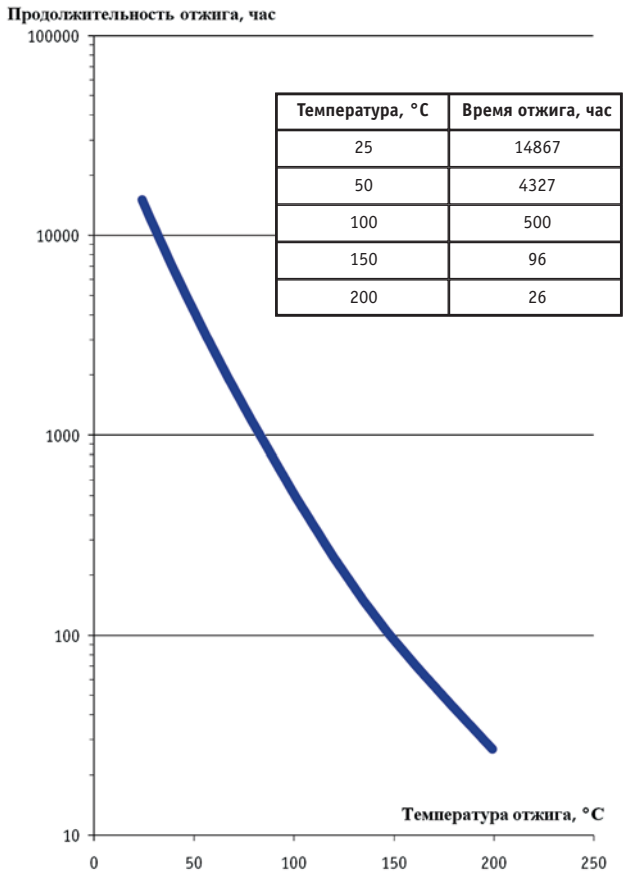
Потоки частиц с энергией до 1 МэВ при длительном воздействии на БА приводят к параметрическим и функциональным отказам, частицы более высоких энергий могут вызвать одиночные сбои. Далее будут рассматриваться меры защиты от параметрических и функциональных отказов. Способы системной защиты от сбоев рассматриваются в [1].

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru



Толщина защитного экрана (Al), мм	Доза, накопленная на участке выведения	Доза, накопленная за 1 год на ГСО
0	4,0E+07	3,0E+07
1	5,0E+05	1,0E+06
2	8,0E+04	8,0E+04
4	1,6E+04	8,0E+03
6	5,0E+03	2,3E+03
8	2,0E+03	8,0E+02
10	1,0E+03	4,0E+02
12	5,5E+02	2,3E+02
14	3,3E+02	1,9E+02
16	3,0E+02	1,8E+02

Рис. 1. Зависимость величины накопленной за один год нахождения на ГСО дозы от толщины защиты (по материалам Кузнецова Н.В., НИИ ЯФ МГУ)



Температура, °С	Время отжига, час
25	14867
50	4327
100	500
150	96
200	26

Рис. 2. Время восстановления КМОП ИМС после радиационного отказа при различной температуре отжига

Предельная накопленная доза и срок активного существования БА

Воздействие ионизирующих излучений (ИИ) приводит к накоплению заряда в КМОП-структуре интегральной микросхемы (ИМС). Скорость возрастания заряда уменьшается при наличии внешней защиты (оболочка КА, смежная аппаратура, стенки прибора, дополнительный алюминиевый экран и т.п.).

Существуют методы расчёта накопленной дозы для разных орбит в точке расположения ИМС с учётом ослабления ИИ от внешней защиты, компоновки КА, конструкции приборов. Накопленная (поглощённая) доза в кремнии ИМС измеряется в радах. На рис. 1 приведены графики зависимости накопленной дозы от толщины защиты для геостационарной орбиты (ГСО).

Параметрический или функциональный отказ ИМС наступает при достижении предельной накопленной дозы (ПНД), определяющей её радиационную стойкость. Значение ПНД определяется при постоянно включённом питании для наиболее тяжёлого нагруженного режима (НР). Для получения данных по ПНД проводят облучение ИМС или БА на γ-установках до возникновения отказа при интенсивностях 1-10 рад/с, что на 3-4 порядка выше, чем интенсивность облучения на орбите.

Для ИМС и устройств, специально предназначенных для использования на КА, ПНД является одним из гарантируемых классификационных параметров. Значение ПНД даётся для активного (включённого) состояния и находится в пределах 100-500 крад. Для коммерческих ИМС такой параметр не регламентируется, а его измеренное значение может находиться в пределах 1-50 крад и иметь разброс, отличающийся в несколько раз, для ИМС одного типа, для ИМС разных партий или в партиях от разных поставщиков.

При оценке ПНД спектральный состав и интенсивность облучения отличаются от условий в космическом пространстве, что является одной из причин погрешности в определении ПНД.

Значение ПНД критических (наименее радиационно-стойких) ИМС определяет предельный срок активного существования ($САС_{пр}$) всего прибора:

$$САС_{пр} = ПНД_{кр} / ((Д_{в} + Д_{г}) \times k)$$

Здесь $ПНД_{кр}$ — значение ПНД критического элемента, $Д_{в}$ — доза, накопленная на участке выведения, $Д_{г}$ — годовая накопленная доза на заданной орбите, k — коэффициент запаса ($k \geq 7$), обеспечивающий приемлемую вероятность безотказной работы при радиационном воздействии [2].

Радиационно-термическая обработка

Радиационный отказ для ИМС может быть обратимым, если он не вызвал дефектов структуры микросхемы или вторичных неисправностей. Накопленный под воздействием ИИ заряд с течением времени рассасывается (релаксирует). При повышенной температуре рассасывание накопленного заряда происходит с большей скоростью. На рис. 2 приведена зависимость времени восстановления работоспособности ИМС после полного радиационного отказа от окружающей температуры (по результатам [3] и [4]). Полностью восстанавливают работоспособность дале-

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

ко не все ИМС. В дефектных ИМС заряд остаётся в местах аномалий структуры. На этом основан метод радиационно-термической обработки (РТО), проводимой с целью отбора ИМС с гарантированной радиационной стойкостью и повышенной надёжностью. Перед использованием ИМС подвергаются радиационному облучению до требуемого уровня, отказавшие ИМС отбраковываются, а оставшиеся выдерживаются при температуре 100-125°С в течение 100-500 часов и ещё раз отбраковываются. Накопленный заряд в радиационно-стойких ИМС полностью рассасывается, и после термотренировки и перепроверки они могут устанавливаться в аппаратуру.

Накопление заряда при выключенном питании

В ИМС под воздействием радиации в каждый момент времени происходит накопление заряда и его релаксация. На величину ПНД существенно влияет локальное электрическое поле в структуре ИМС, задерживающее процесс релаксации. Поэтому ПНД ИМС одного и того же типа может существенно (в несколько раз) отличаться в зависимости от режима работы (величина тактовой частоты, режим записи или считывания, параметры входного сигнала и т.п.). В выключенном состоянии накопление заряда происходит медленнее, так как электрическое поле отсутствует и не препятствует релаксации заряда. В связи с этим ПНД в выключенном состоянии оказывается в несколько раз выше, чем во включённом.

Таблица 1. Результаты радиационных испытаний

№	Наименование ИМС или устройства	Предельная накопленная доза (крад)			Дата и место испытаний
		Включено	Переключение	Выключено	
1	564ЛН2	50	110	>300,0	июнь-декабрь 1997 г., НПП «ОПТЭКС»
2	Некорпусированная флэш-память, 256 кбайт	30		240	январь-февраль 2001 г., НПП «ОПТЭКС»
3	Am 28F020, флэш-память, 256 кбайт	15…16,5	24	80…83	апрель-декабрь 2000 г., МИФИ
4	AT 29C256, флэш-память, 256 кбайт	20…22			
5	TC55257 DPI-85L, ОЗУ, 32 кбайт	16			
6	MAX1480 AEP1, приёмник-передатчик RS-485	27…35,0			
7	MAX480, приёмник-передатчик RS-485	33,5	42	78	
8	Модуль MicroPC 6024, Octagon Systems	7…9,5			январь-октябрь 1996 г., октябрь 2000 г. РНЦ «Курчатовский институт»
9	Модуль MicroPC 5025, Octagon Systems	9,5		65	
10	Модуль MicroPC 6024, Octagon Systems	10,1			январь-апрель 2000 г. РНЦ «Курчатовский институт»

Принудительное переключение режима (ППР)

При периодическом чередовании включённого и выключенного состояний избыток заряда, накопленный во включённом состоянии, рассасывается в выключенном состоянии. При времени, достаточном для релаксации избыточного заряда, ПНД стремится к значению, соответствующему выключенному состоянию. Длительность включённого состояния выбирается так, чтобы накопленный заряд был в несколько раз меньше, чем при ПНД включённого состояния.

Механизм релаксации в КМОП ИМС более подробно рассматривался в докладе Николаева Ю.М. на Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость-2000» в [3] и в других источниках.

Результаты испытаний

В таблице 1 приведены результаты радиационных испытаний, проведённых в ходе работ РНИИ КП с РНЦ «Курчатовский институт», МИФИ и в НПП «Оптэкс» в течение последних лет. В отличие от общепринятого режима определения ПНД во включённом состоянии, испытания предусматривали определение ПНД для выключенного состояния и для режима с периодической сменой включённого и выключенного состояний. Испытания подтвердили увеличение предельной накопленной дозы в этих режимах до 10 раз.

ИМС флэш-памяти 28F020 испытывались дважды: после первоначальной проверки ПНД они подвергались отжи-

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

гу и испытывались повторно — в результате были получены практически те же значения ПНД, что и в первом цикле.

Испытания проходили при интенсивности облучения на 3 порядка выше, чем в реальных условиях на орбите, и при одинаковом времени в цикле для включенного и выключенного состояний. Однако в ходе испытаний за это время (2-3 часа) не успевала закончиться релаксация избыточного, накопленного при облучении заряда. В реальных условиях при естественной интенсивности облучения и такой же накопленной дозе время на релаксацию в режиме ППР будет больше времени НР на 3 порядка и составит 50-100 часов; за счёт этого можно ожидать накопление за время НР меньшего, чем при испытаниях, заряда и создание более благоприятных для его релаксации условий, а в конечном счёте — и более высокую ПНД, стремящуюся к ПНД в выключенном состоянии. Таким образом, условия испытаний оказались более жесткими, чем на орбите, и было принято решение о корреккции методики эксперимента.

В следующем году планируется продолжение испытаний по откорректированной методике и получение соответствующих характеристик для модулей MicroPC 2133 фирмы Octagon Systems, а также для ряда отечественных и зарубежных ИМС.

Методика радиационных испытаний ИМС

Внедрение предложенных режимов требует создания базы данных по ПНД не только для включённого, но и для выключенного состояния. Для радиационных испытаний элементной базы предполагается использовать следующую методику:

- радиационным испытаниям подвергаются только ИМС, прошедшие предварительную отбраковку в режиме диагностического контроля параметров;
- определяется ПНД первого образца, находящегося в выключенном состоянии, питание подаётся только на время проверки функционирования;
- при отсутствии данных на втором образце определяется ПНД во включённом состоянии;
- третий образец испытывается в режиме переключения: обеспечивается суммарная доза порядка 5-10% ПНД включённого состояния, затем образец выдерживается в выключенном состоянии в течение 50-100 часов до получения такой же дозы, что и при включенном состоянии (интенсивность облучения соответственно снижается). ПНД первого образца должно быть близким к ПНД третьего;
- в случае если подтверждается предположение, что ПНД в режиме переключения и в выключенном состоянии достаточно близки, испытания аналогичных образцов в переключающем режиме могут не проводиться.

Методика радиационных испытаний аппаратуры

Радиационные испытания приборов БА обходятся весьма дорого и проводятся для одного нерезервированного комплекта в режиме переключения по методике, аналогичной методике для испытаний ИМС в режиме переключения. Одновременно с испытаниями прибора в той же камере при аналогичной интенсивности облучаются критические ИМС (для MicroPC это флэш-память) в трех режимах (включенном, выключенном и при переключении). При корректном проведении испыта-

Оценка вероятности безотказной работы платы MicroPC 6024 в условиях КА

В стандарте РД 11 1003-2000 «Изделия полупроводниковой электроники. Метод прогнозирования вероятности безотказной работы в условиях низкоинтенсивного ионизирующего облучения» вероятность безотказной работы ($ВБР_\Sigma$) определяется как произведение вероятности безотказной работы при отсутствии радиации (P_λ) на вероятность отсутствия радиационного отказа (P_p),

$$ВБР_\Sigma = P_\lambda \times P_p$$

В свою очередь,

$$P_\lambda = exp(-\lambda t),$$

где λ — интенсивность отказов аппаратуры (для платы 6024 $\lambda = 2{,}57 \times 10^{-6}$),

t — время эксплуатации (САС).

$$P_p = \prod_{i=1}^{k} (p_{pi})^n,$$

где p_{pi} — вероятность отсутствия радиационного отказа комплектующих микросхем,

n — общее число микросхем.

Для отдельной микросхемы

$$p_{pi} = 2 - exp(K_p D)^2,$$

где K_p — коэффициент радиационного повреждения микросхемы,

D — доза, накопленная за время эксплуатации.

Испытания [5] показали, что наиболее критическим к радиации элементом на плате 6024 является СБИС флэш-памяти типа Am28F020, которая фактически и определяет радиационную стойкость всей платы. Поэтому полагаем

Вероятность безотказной работы MicroPC 6024 при САС 5 лет

Кратность резерва	Режим и вид резервирования	Без воздействия радиации	Геостационарная орбита (D=800рад/год)
Без резерва	Непрерывная работа	0,893147	0,168227
	Сеансовый режим (2 часа в сутки)	0,990229	0,943254
2	«Горячий» резерв	0,988582	0,277925
	«Холодный» резерв	0,917560	0,755419
	ППР один раз в месяц	0,945066	0,935498
3	«Горячий» резерв	0,998780	0,386417
	«Холодный» резерв	0,999560	0,864222
	ППР один раз в месяц	0,962670	0,955894

$$ВБР_\Sigma\ (6024) = P_\lambda\ (6024) \times p_p(Am28F020)$$

Для определения K_p микросхемы Am28F020 проводились радиационные испытания при низкой мощности дозы (0,1 рад/с) в выключенном и включённом состояниях. В режиме ППР была вычислена постоянная D_τ экспоненциальной функции, описывающей переходный процесс из включённого состояния в выключенное.

Результаты испытаний использовались для прогнозирования $ВБР_\Sigma$ (6024) на геостационарной орбите при толщине алюминиевого защитного экрана 8 мм, в различных режимах и конфигурациях.

Полученные значения вероятности безотказной работы (см. таблицу) иллюстрируют существенное снижение надёжности при радиационном облучении и эффективность использования сеансового режима и «холодного» резерва при ППР.

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru

ний значения ПНД в режимах переключения и в выключенном должны быть примерно равны (10-20%).

Режимы БА

Электронные приборы КА, как правило, резервируются с кратностью 2 или 3. Резервные комплекты могут находиться во включённом или выключенном состоянии («холодный» или «горячий» резерв). В свою очередь, аппаратура может использоваться в сеансовом или дежурном режиме.

В сеансовом режиме приборы включаются на определённый промежуток времени, а большую часть времени могут находиться в выключенном состоянии. Для аппаратуры сеансового режима определяющим является величина ПНД в выключенном состоянии. Для такой аппаратуры проще обеспечить длительный САС, требуется меньшая толщина защитного экрана, может использоваться менее радиационно-стойкая элементная база. Именно в сеансовом режиме желательно применять индустриальные средства типа процессорных модулей MicroPC фирмы Octagon Systems. Для равномерного и более глубокого рассасывания накопленной дозы радиации между сеансами нужно чередовать включение основного и резервного комплектов на предстоящий сеанс.

В дежурном режиме аппаратура должна функционировать практически постоянно, перерывы допускаются на ограниченное время и в определённые моменты. Для этого режима работы характерно, как правило, «горячее» резервирование аппаратуры, поэтому радиационная стойкость определяется ПНД включённого состояния. Если использовать «холодный» резерв, можно повысить радиационную стойкость аппаратуры. Для этого необходимо периодически через 1-2 месяца переводить резервированные комплекты из одного состояния в другое. При принудительном переключении режима накопленная во включённом состоянии доза после выключения рассасывается в течение времени, на три порядка большего, чем при испытаниях, и перед следующим включением практически становится равной величине дозы, накопленной в выключенном состоянии.

Использование ППР значительно повышает вероятность безотказной работы в условиях воздействия радиации (см. врезку).

Выводы

Для ИМС и аппаратуры, функционирующих в сеансовом режиме или в условиях ППР, радиационная стойкость в несколько раз выше, чем для постоянно включённых устройств БА.

Повышение радиационной стойкости аппаратуры КА за счёт целенаправленного использования эффекта повышения ПНД в выключенном состоянии определяет требования к архитектуре БА и организации управления при эксплуатации КА [1].

Использование сеансового режима и ППР позволит более широко применять для комплектации БА готовые вычислительные средства индустриального назначения и коммерческие ИМС.

Предлагаемый метод может повысить радиационную стойкость аппаратуры и при искусственном излучении (ядерный реактор и т.п.). ●

Авторы выражают благодарность Кузнецову Н. и Поливанову А. за предоставленные при подготовке данной статьи материалы.

Литература

1. Олег Гобчанский. Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов// СТА. — 2001. — № 4.

2. Попов В.Д. Вероятность безотказной работы ИС при различных «запасах» по дозе ионизирующего излучения/ Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2001»: Научно-технический сборник. Вып. 4. — М.: Паимс, 2001.

3. Поливанов А.П., Попов В.Д. Модель восстановления работоспособности элементов СБИС ОЗУ после γ-облучения/ Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы докладов XXX международного научно-технического семинара. — М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2000.

4. Катеринич И.И., Курин Ф.М., Попов В.Д. Метод радиационно-термической отбраковки и повышения надёжности МОП интегральных схем// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. — 1995. — Вып. 3-4.

5. Гобчанский О.П. Применение MicroPC в вычислительных комплексах специального назначения// СТА. — 1997. — № 1.

Авторы — сотрудники РНИИ КП, МИФИ, ЗАО НПП «ОПТЭКС»
Телефоны: (095) 273-9354, 323-9068, 532-8026

© 2001, СТА Тел.: (095) 234-0635 Факс: (095) 232-1653 http://www.cta.ru