

## Восприимчивость электронных компонентов и оборудования к ЭМИ ЯВ: факты и следствия

Наша уязвимость увеличивается ежедневно вместе с расширением использования электроники и ростом нашей зависимости от нее в гражданских и в военных секторах.

*Д-р Вильям Грэхем,  
председатель комиссии Конгресса США по ЭМИ ЯВ*

**Сегодня уже невозможно представить инфраструктуру страны без электронного оборудования, основанного на микропроцессорных системах и компьютерах, особенно такие критические части, как электроснабжение, водоснабжение и канализация, связь, транспортные сети. Современное электронное оборудование работает с электрическими сигналами намного более низкого уровня, чем силовое электротехническое оборудование начала XX в. или даже устройства предыдущего поколения (на основе электровакуумной техники), а также имеет гораздо более сложную и разветвленную внутреннюю архитектуру. Это обусловило резкое повышение уязвимости такого оборудования к ЭМИ ЯВ, а вместе с ним и всей инфраструктуры страны. Какова реальная восприимчивость различных электронных компонентов и устройств на их основе к ЭМИ ЯВ? Как на практике можно использовать это знание? Ответы на поставленные вопросы попытался дать автор статьи.**

Владимир ГУРЕВИЧ

Электронному оборудованию всегда уделяется особое внимание при рассмотрении вопросов, касающихся влияния ЭМИ ЯВ на инфраструктуру. Так, в основополагающем отчете комиссии Конгресса США по воздействию ЭМИ ЯВ на критические части инфраструктуры страны вопросы уязвимости электронного оборудования рассматриваются в первую очередь. Собственно говоря, и начинается отчет с анализа уязвимости именно такой электронной системы. Первая глава этого объемного многостраничного отчета называется «Система СКАДА. Влияние уязвимости системы СКАДА на критическую инфраструктуру» [1]. СКАДА (Supervisory Control And Data Acquisition — SCADA) — это программно-аппаратный комплекс, предназначенный для систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации в реальном времени в сложных и разветвленных системах различного назначения, компоненты которых работают автономно в автоматическом режиме и располагаются в удаленных или труднодоступных местах, например системы электро- и водоснабжения.

По данным, приведенным в этом отчете, проверка компьютеров, локальных сетей и компьютерного сетевого оборудования общего назначения показала, что при длине соединительных кабелей 7–60 м величина наводимых в них токов может достигать до 100–700 А, при этом все компьютерное оборудование гарантированно выводится из строя. В ходе проверки выявилась неэффективность многократного дублирования и резервирования оборудования, несоответствие объемов рационального резерва и номенклатуры запчастей, численности эксплуатационных подразделений и т. д.

В отчете комиссии отмечается, что при воздействии ЭМИ может быть выведена из строя значительная часть электронного оборудования гражданских систем связи и телекоммуникаций, причем системы мобильной связи будут выведены из строя в значительно большей степени, нежели обычные линии связи. Даже слабый уровень ЭМИ приведет к отказу систем мобильной связи на несколько дней, а проводных линий связи — на несколько часов. Оценки были

произведены на разработанной модели поражения от ЭМИ и последующего восстановления системы мобильной связи.

В отчете дана оценка устойчивости к ЭМИ современных электропоездов, которые оснащены микропроцессорной системой управления. В новых моделях имеется три компьютера управления всеми подсистемами. Даже выход из строя одного из них вынудит локомотив остановиться. Сбой в работе его оборудования начинается при напряженности электрического поля ЭМИ 4–8 кВ/м, а гарантированный выход из строя наступает при 20–40 кВ/м. По заключению комиссии, восстановления железнодорожного сообщения за счет ремонта оборудования можно ожидать через несколько дней или недель, а при необходимости замены поврежденных компьютерных систем на это потребуются несколько месяцев.

По данным, полученным в ходе испытаний 37 легковых автомобилей выпуска 1986–2002 гг. и 18 грузовых машин производства 1991–2003 гг. на воздействие стандартного ЭМИ ЯВ с напряженностью электрическо-

го поля до 50 кВ/м, оказалось, что около 10% автомобилей сразу выйдут из строя и, что наиболее вероятно, с аварийными последствиями при значениях напряженности электрического поля 25–30 кВ/м и более. В крупных городах из строя выйдут также центры управления дорожным движением, что усложнит ситуацию. Отсутствие электроэнергии приведет к отключению большинства светофоров.

Можно было бы еще долго перечислять подробности всеобщего коллапса, который наступит при воздействии ЭМИ ЯВ на инфраструктуру целой страны, однако значительно больший интерес для специалистов с точки зрения понимания процессов, происходящих в электронной аппаратуре, и возможных путей ее защиты представляет, по нашему мнению, рассмотрение конкретных вопросов на уровне элементной базы электронной аппаратуры.

В течение последних 50 лет было выполнено довольно много интересных исследований, посвященных уязвимости ЭМИ ЯВ отдельных электронных компонентов, а также интегральных микросхем, микропроцессоров, микроконтроллеров, компьютеров и компьютерных сетей. Приведем результаты некоторых из этих исследований.

В дискретных электронных компонентах, таких как диоды, транзисторы, конденсаторы, резисторы и других, нарушения работоспособности в результате электромагнитного воздействия являются, как правило (но не всегда!), необратимыми и связаны с разрушением их внутренней структуры под действием импульса обратного приложенного напряжения или импульса прямого тока, превышающих определенные пороговые значения.

В техническом отчете, написанном сотрудниками Лаборатории военно-воздушных сил США [2], подробно анализируются различные теоретические модели процесса пробоя полупроводниковой структуры диодов и транзисторов, показана ограниченность тех или иных моделей и приведена их критика. Получили распространение две основные модели: термическая (модель Wunsch-Bell) и электротермическая (модель Ward и модель Baguch-Budenstein), названные по имени их авторов. В отчете отмечено, что термическая модель Wunsch-Bell недостаточно точно отражает физические процессы, протекающие при пробое в полупроводниковой структуре, в частности, когда речь идет о наносекундах, попытки применения модели Wunsch-Bell являются некорректными. Однако как значимый факт признано, что при быстром снижении мощности воздействующего импульса ниже некоторого порогового предела полупроводниковый прибор может восстановить свою работоспособность.

Таким образом, в полупроводниковых элементах и (что более важно и актуально) в электронных устройствах, содержащих

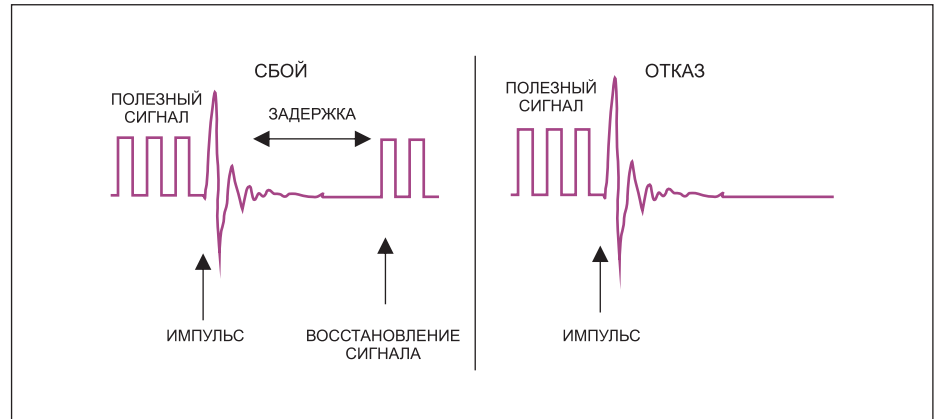


Рис. 1. Сбои и отказы в полупроводниковых приборах и устройствах на их основе под действием внешнего воздействующего импульса

эти элементы, возможны два вида нарушения работоспособности: обратимое (сбой) и необратимое (отказ), рис. 1.

При сбое не происходит физического разрушения внутренней структуры полупроводникового прибора или микросхемы и работоспособность полностью восстанавливается через некоторое время задержки автоматически, без участия человека, или вручную, при перезагрузке системы (если речь идет о компьютерной системе).

При отказе происходит физическое разрушение внутренней структуры полупроводникового устройства, связанное с разрушением *p-n*-переходов (расплавлением) полупроводниковой структуры (рис. 2) [3] или пробоем изоляции между отдельными элементами в интегральных схемах (рис. 3) [4]. При отказе работоспособность устройства не может быть восстановлена и поэтому требуется замена отказавшего элемента (устройства).

По нашему мнению, чисто теоретические споры о более или менее корректном описании физики процессов при отказе полупроводниковой структуры диодов и транзисторов имеют лишь теоретический, но отнюдь не практический интерес, поскольку разброс параметров, получаемые в результате экспериментов даже для однотипных групп диодов и транзисторов, настолько велики, что сводят на нет значимость споров о точности той или иной модели. В качестве подтверждения на рис. 4 приведены экспериментальные данные, полученные в [5] для широко распространенного биполярного транзистора общего применения типа 2N2222, выпускаемого десятки лет многими фирмами.

Совершенно очевидно, что при таком значительном разбросе экспериментальных данных точность той или иной теоретической модели не имеет никакого практического значения.

В любом случае, повреждения полупроводниковых диодов и транзисторов связаны в той или иной степени с температурными процессами и разрушением *p-n*-переходов, вот почему совершенно очевидно, что мощ-

ность импульса, разрушающего полупроводниковую структуру, будет зависеть от длительности (ширины) этого импульса. Такие экспериментально полученные зависимости для различных типов полупроводниковых приборов приведены на рис. 5 [5].

На рис. 5 можно видеть, что область на графике, где происходит разрушение транзисторов или диодов определенного типа, — это не прямая линия, а действительно некая область, в которой с определенным разбросом расположены многочисленные точки, соответствующие экспериментальным данным, аналогично тому, как это показано на рис. 4. Прямыми линиями обозначены лишь некие очень усредненные и обобщенные тренды, определяемые этими точками.

В более сложных микросистемных элементах, например интегральных микросхемах, помимо необратимых повреждений происходят и сбои в работе (рис. 6) [6], которые в действительности часто встречаются на практике, в отличие от очень редких сбоев дискретных полупроводниковых элементов.

Интересный момент заключается в принципиально различной реакции микросхем с транзисторами, выполненных по технологии КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник; CMOS — complementary metal-oxide-semiconductor), и микросхем с биполярными транзисторами. У микросхем на биполярных транзисторах (в отличие от КМОП) практически не наблюдается сбоев в работе, а сразу наступают необратимые повреждения (об этой особенности биполярных транзисторов упоминалось выше). Схемы с использованием КМОП-технологии изобрел в 1963 году Фрэнк Вонлас (Frank Wanlass) из компании Fairchild Semiconductor. В настоящее время скорость переключения, плотность монтажа и энергопотребление, обеспечиваемые КМОП-технологией, являются недостижимыми в технологиях, основанных на биполярных транзисторах. Поэтому логические микросхемы на КМОП-транзисторах сегодня почти полностью вытеснили микросхемы

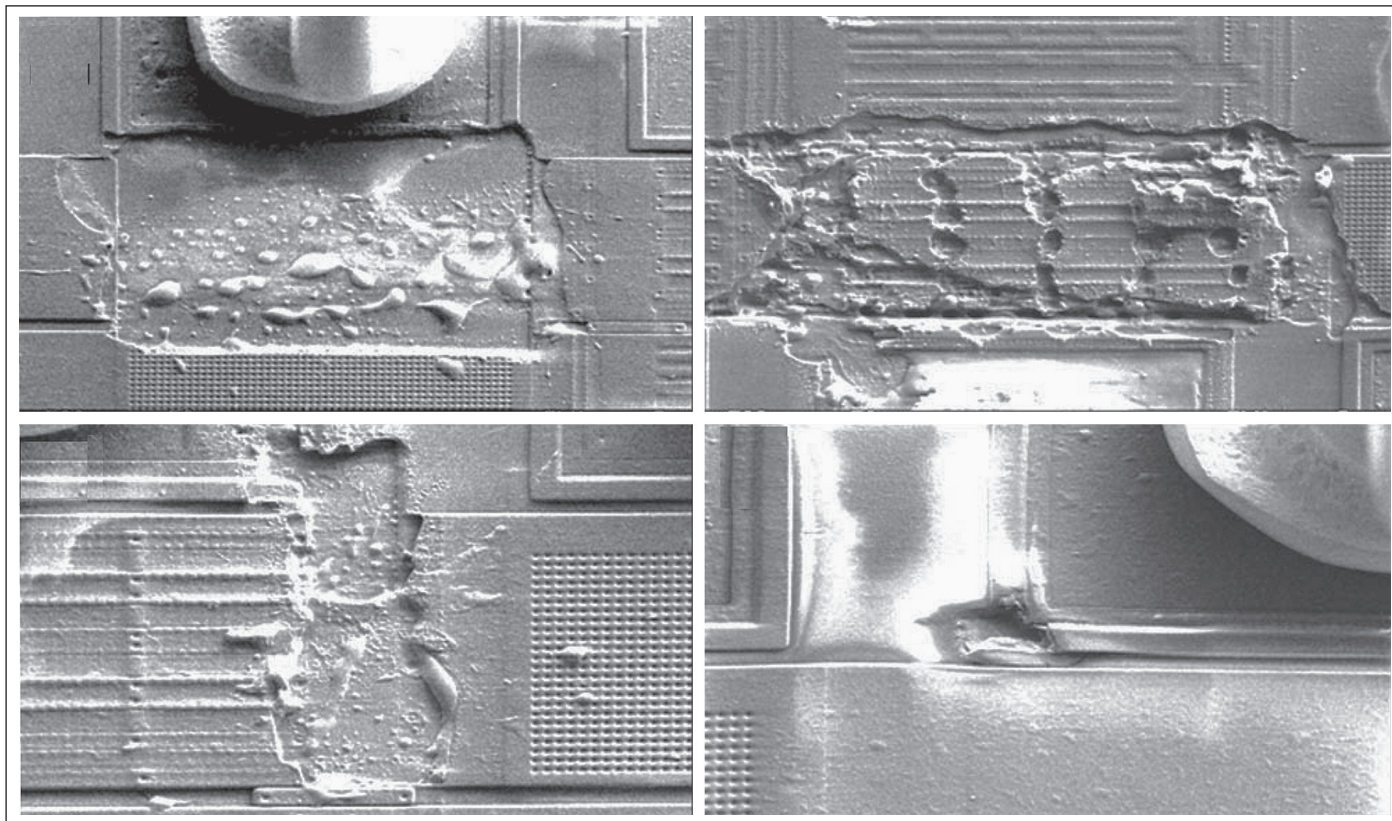


Рис. 2. Пробой и расплавление полупроводниковых структур микропроцессора под воздействием электромагнитного импульса 7,5/180 нс (снимки сделаны с помощью микроскопа)

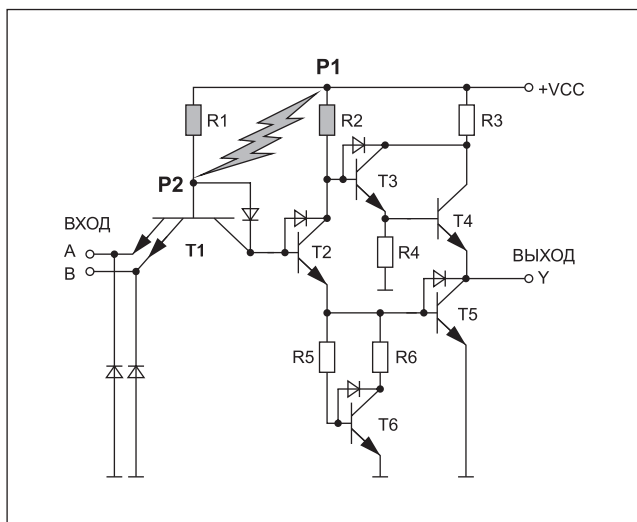


Рис. 3. Отказ интегральной микросхемы серии 7400 (логического элемента И-НЕ на транзисторах Шоттки), вызванный пробоем между точками P1 и P2 схемы и закорачиванием резистора R1

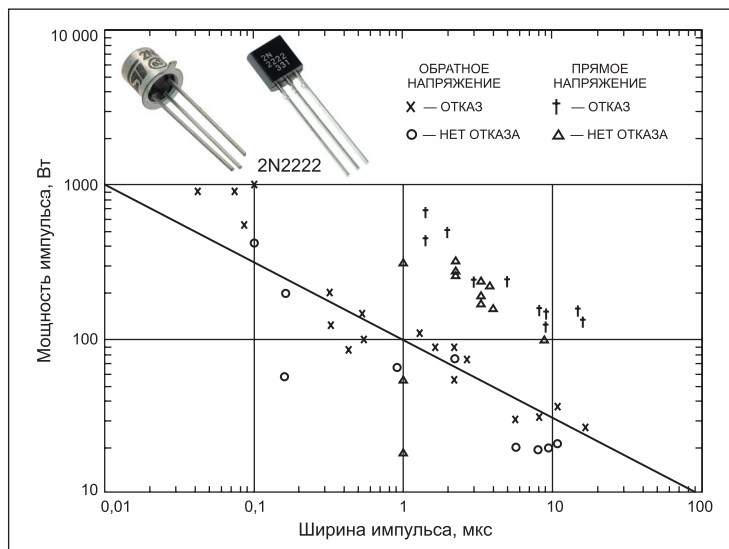


Рис. 4. Разбросы параметров отказов группы транзисторов типа 2N2222 в процессе реальных испытаний

на биполярных транзисторах. Это означает, что сбой в работе логических микросхем под воздействием импульса внешнего электрического поля в настоящее время являются более актуальными, чем ранее.

Относительно высокую устойчивость отдельно взятых микросхем к импульсу внешнего электрического поля можно объяснить малыми геометрическими размерами микросхем и малыми расстояниями между выводами. При малых расстояниях и разность

потенциалов между токоведущими элементами, подвергнутыми влиянию импульса внешнего электрического поля, будет относительно небольшой. Однако если учесть, что под действием ЭМИ ЯВ на внешних проводах и кабелях, подключенных ко входам электронных приборов (в том числе и микросхем), наводятся высокие напряжения, которые будут напрямую приложены ко входам и выходам микросхем, то положение дел становится значительно более серьезным.

В таблице 1 [7] приведены данные об отказах микросхем различных типов при прямом приложении напряжения к их входам. В ходе экспериментов изменялась амплитуда и длительность прикладываемых импульсов. Эти значения были зафиксированы. Остальные значения (ток, мощность, энергия) не были жестко зафиксированы и зависели от амплитуды прикладываемого напряжения и длительности импульсов. Их значения получались в результате измерений.



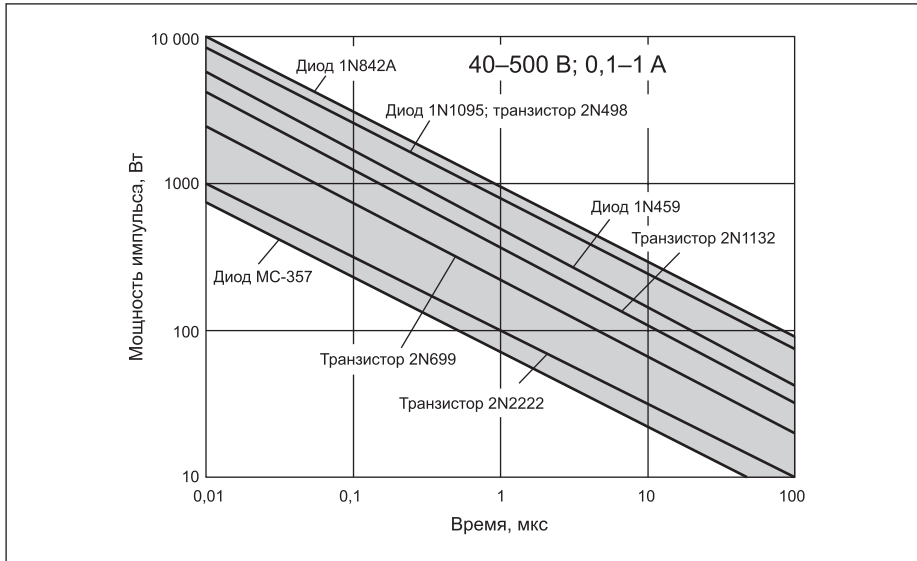


Рис. 5. Зависимость мощности разрушающего импульса от его длительности (для диодов и транзисторов с максимальным рабочим напряжением 40–500 В и током 0,1–1 А)

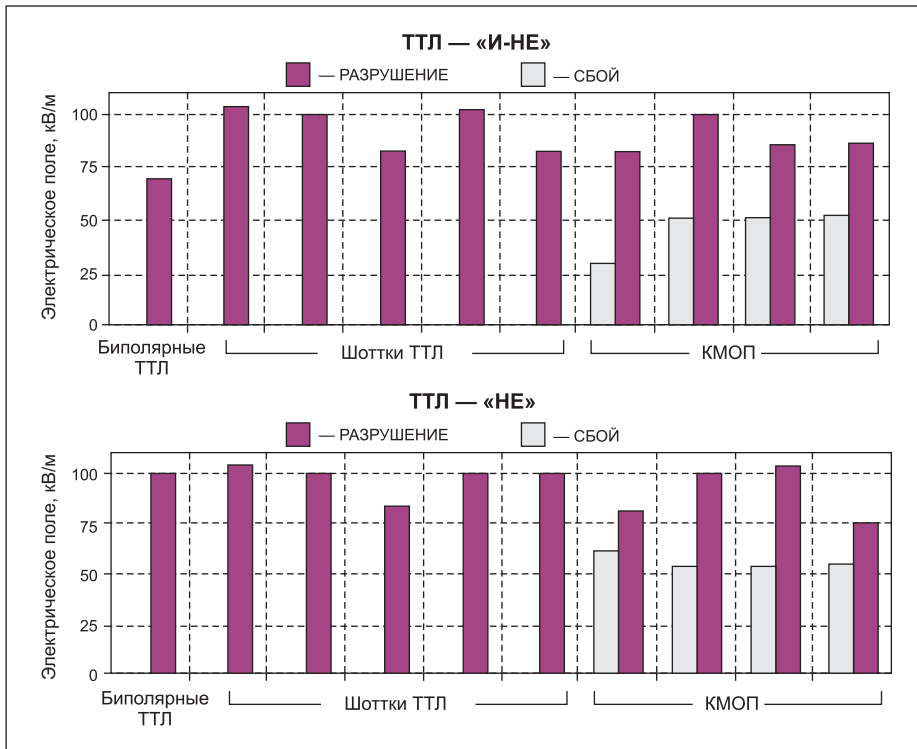


Рис. 6. Сбои и отказы различных типов логических микросхем под действием импульса внешнего электрического поля

Как видно из приведенных данных, отказы микросхем наступают при относительно небольших напряжениях, намного меньших тех реальных напряжений, которые могут возникнуть под действием ЭМИ ЯВ при отсутствии надлежащей защиты от импульсных перенапряжений. Кроме того, можно заметить, что восприимчивость микросхем к импульсу приложенного напряжения снижается с уменьшением его длительности.

Как показано в [8], разброс параметров, определяющих разрушение полупроводниковых приборов под действием коротких

импульсов напряжения, подчиняются логарифмически нормальному (или логнормальному) распределению (рис. 7).

В данном случае речь идет об импульсном напряжении, напрямую приложенном к выводам микросхемы. Из данных, представленных на рис. 7, можно видеть существенное увеличение выдерживаемого микросхемой до повреждения напряжения при уменьшении длительности воздействующего импульса, что хорошо согласуется и с рис. 5, и с данными таблицы 1. Однако на рис. 7 можно также заметить, что разброс уровней повреж-

Таблица 1. Параметры повреждающих импульсов, приложенных к выводам микросхем некоторых типов

8Т15 Линейный драйвер 8Т17 Приемник		Ширина импульса		
		25 нс	100 нс	1 мкс
8Т15 Выходы	Напряжение, В	150	140	60
	Импульс тока, А	9	2	0,55
	Мощность, Вт	1350	280	33
	Энергия, мкДж	33,7	28	33
8Т16 Вход	Напряжение, В	220	175	125
	Импульс тока, А	1,5	0,8	0,14
	Мощность, Вт	330	140	17,5
	Энергия, мкДж	8,25	14	17,5
5404 Биполярные ТТЛ 54L30 Маломощные ТТЛ		Ширина импульса		
		25 нс	100 нс	1 мкс
5404	Напряжение, В	120	50	30
	Импульс тока, А	3	1	0,5
	Мощность, Вт	360	50	15
	Энергия, мкДж	9	5	15
54L30	Напряжение, В	90	50	20
	Импульс тока, А	4	2	0,8
	Мощность, Вт	360	100	16
	Энергия, мкДж	9	10	16
μА747 Биполярный операционный усилитель		Ширина импульса		
		25 нс	100 нс	1 мкс
μА747 Вход		Нет повреждений до напряжения 500 В		
μА747 Выход	Напряжение, В	65	100	200
	Импульс тока, А	6,5	9	12
	Мощность, Вт	422	90	2400
	Энергия, мкДж	10,5	90	2400
КМОП CD4000-серия		Ширина импульса		
		25 нс	100 нс	1 мкс
CD4001A Вход	Напряжение, В	350	150	60
	Импульс тока, А	10	7	1,2
	Мощность, Вт	3500	1050	72
	Энергия, мкДж	87,5	105	72
CD4016 Вход	Напряжение, В	150	120	20
	Импульс тока, А	2	4	2
	Мощность, Вт	300	480	40
	Энергия, мкДж	7,5	48	40
CD4049 Выход	Напряжение, В	150	25	12
	Импульс тока, А	15	6	3
	Мощность, Вт	2250	150	36
	Энергия, мкДж	56,2	15	36
CD4050 Выход	Напряжение, В	170	60	20
	Импульс тока, А	13	7,5	3
	Мощность, Вт	2210	450	60
	Энергия, мкДж	55,2	45	60
CD4050 Вход	Напряжение, В	120	60	24
	Импульс тока, А	4	4	2
	Мощность, Вт	480	240	48
	Энергия, мкДж	12	24	48
CD4071 Вход	Напряжение, В	80	150	250
	Импульс тока, А	5,2	0,3	0,4
	Мощность, Вт	416	45	100
	Энергия, мкДж	10,4	4,5	100

дающего напряжения достаточно велик и относится лишь к микросхеме одного типа.

Значительно более низкую электрическую прочность имеют микропроцессоры. Вообще тенденция развития электроники — это беспрерывное уменьшение размеров отдельных элементов, рост плотности внутреннего монтажа и сложности интегральных схем и микропроцессоров, уменьшение изоляционных слоев и, как следствие, снижение рабочего напряжения. В течение многих лет этот тренд хорошо описывался так называемым законом Мура (Мора) [9], сформулированным в 1965 году одним из учредителей компании Intel Гордоном Муром (Gordon Moor).

Этот закон гласит, что количество транзисторов в микропроцессорах удваивается примерно каждые два года, а их производительность растет экспоненциально (рис. 8). Этот закон действует уже десятки лет.

Более подробные данные по микропроцессорам до уровня Pentium III [3] представлены в таблице 2, а также на рис. 9, 10 [6].

Для сравнения: микропроцессор Intel Pentium IV HT 661, B1 работает на частоте 3600 МГц, имеет напряжение питания 1,25 В при технологической норме 0,065 мк (технологическая норма определяет минимальный размер элементов, которые могут быть сформированы на полупроводниковой пластине в процессе фотолитографии, лежащем в основе производства микропроцессоров). Огромная плотность элементов на единице площади кристалла приводит к такому же огромному тепловыделению и, соответственно, к необходимости особо эффективной системы охлаждения. Это и другие ограничения, по-видимому, приведут вскоре к замедлению прогрессирующего роста количества транзисторов и нарушению закона Мура. Однако уже достигнутый сегодня уровень по плотно-

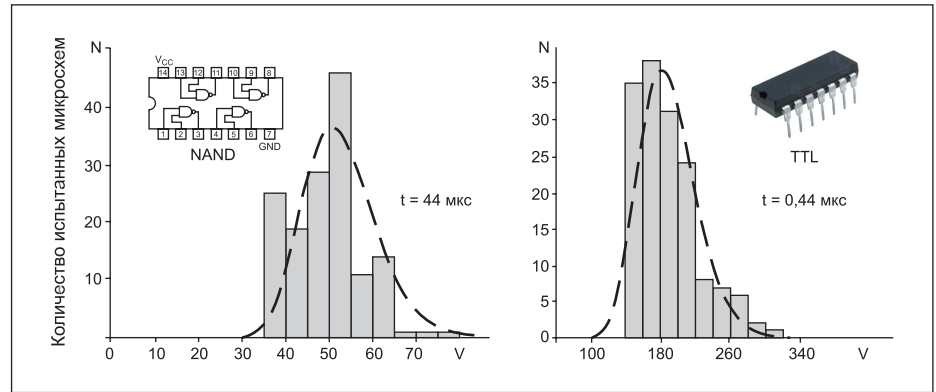


Рис. 7. Логнормальное распределение повреждений микросхем 7400-й серии импульсами напряжения длительностью 44 и 0,44 мкс

сти монтажа элементов (а значит, по изоляционным расстояниям между ними), по уровню напряжения питания и рабочей частоте говорит сами за себя: уязвимость к ЭМИ ЯВ современных микропроцессоров стала намного большей, чем была 20–30 лет назад.

Дальнейшие исследования в этой области показали, что восприимчивость микро-

процессоров к внешнему электромагнитному импульсу зависит в немалой степени и от частотных характеристик импульса (рис. 11) [3]. Как видно на рис. 11, восприимчивость микропроцессора к короткому импульсу с высокой скоростью нарастания переднего фронта (характерному больше для сверхширокополостного (СШП) импульса,

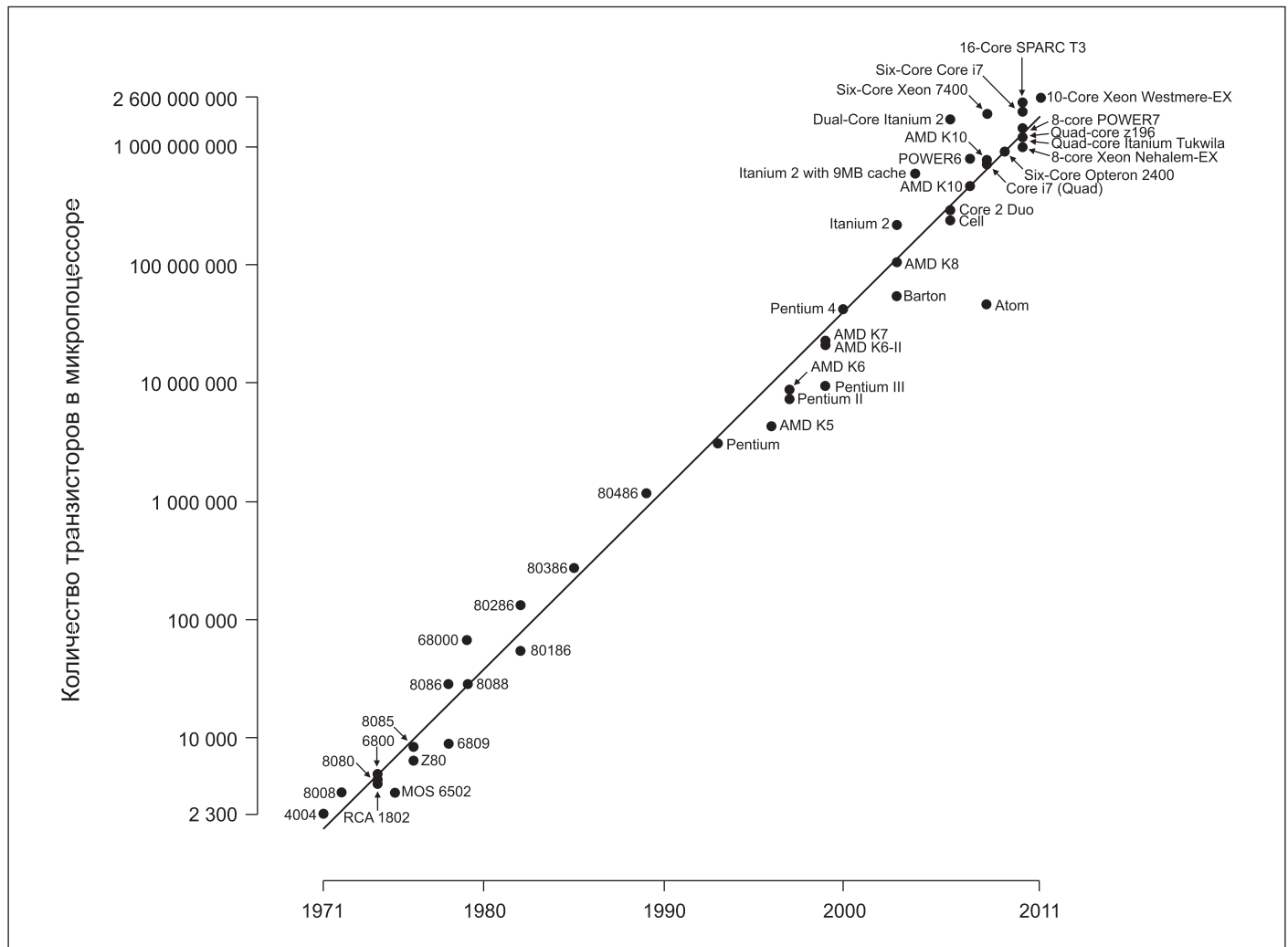


Рис. 8. Рост числа транзисторов на кристалле микропроцессора в течение 40 лет. Вертикальная ось имеет логарифмическую шкалу, поэтому прямая линия соответствует экспоненциальному закону

**Таблица 2.** Данные о микропроцессорах (до Pentium III включительно)

Процессор (Intel)	Тактовая частота, МГц	Технологическая норма, мкм	Рабочее напряжение, В	Количество транзисторов
8088	5	> 1,5	12	28 000
80286	10	1,5	5	130 000
80386DX20	20	1,5	5	275 000
80486DX25	25	1	5	1 200 000
80486DX33	33	1	5	1 200 000
P80486DX266	66	0,6	5	1 200 000
Pentium I	75	0,6	3,3	3 300 000
Pentium I	100	0,6	3,3	3 300 000
Pentium MMX	200	0,35	2,8	4 500 000
Pentium II	266	0,28	2,5	7 500 000
Pentium III	450	0,25	2	9 500 000
Pentium III	500	0,18	2	28 000 000

генерируемого специальными направленными источниками излучения, чем для более длинного импульса ЭМИ ЯВ с заметной меньшей скоростью нарастания переднего фронта) значительно выше. Несмотря на меньшую энергию СШП-импульса, эффективность его воздействия по энергии и напряжению на типовую электронную систему оказывается большей. Для СШП-импульса первые сбои начинают происходить при напряженности 12 кВ/м, в то время как для ЭМИ ЯВ — при 30 кВ/м.

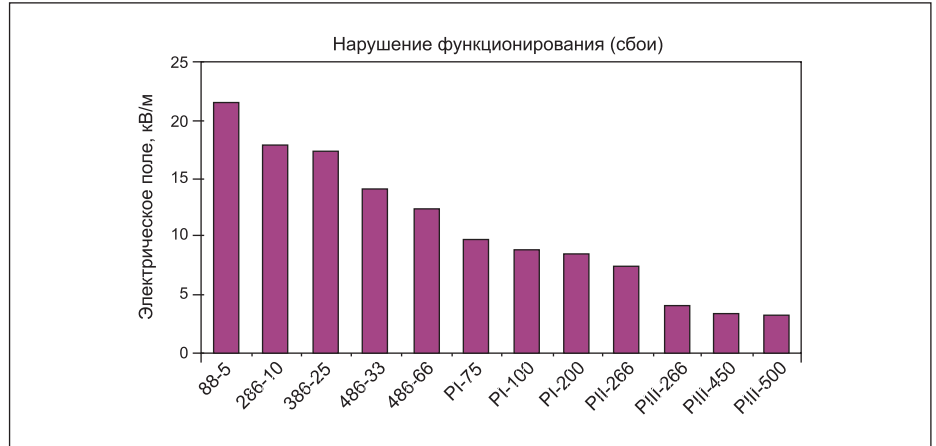
Из этого в [3] делается вывод о том, что мерой наводимой энергии является не общая энергия импульса, а энергия в определенном частотном интервале.

Еще большую восприимчивость к ЭМИ ЯВ имеют сложные системы на основе микропроцессоров, такие как компьютеры. Однако при испытаниях отдельно стоящих персональных компьютеров, снабженных стандартным металлическим кожухом, выполняющим роль достаточно эффективного экрана, ослабляющего внешнее электромагнитное поле, в [3] были получены очень высокие значения амплитуды импульса этого поля, вызывающего отказы (рис. 12).

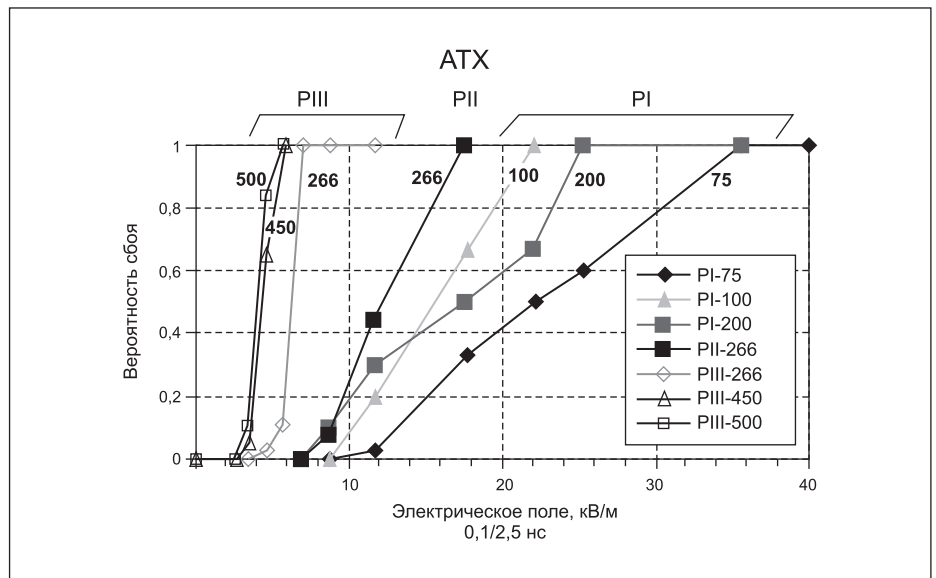
Размер материнской платы намного превышает размеры отдельных элементов компьютера, поэтому и разность потенциалов, возникающая на ней при воздействии импульса внешнего электрического поля, намного превышает разность потенциалов между выводами небольших по размеру элементов.

Совершенно очевидно, что при переходе от отдельно стоящего и защищенного экранящим кожухом компьютера к компьютерной сети с ее протяженными кабелями связи ситуация будет кардинально иной (рис. 13) [3].

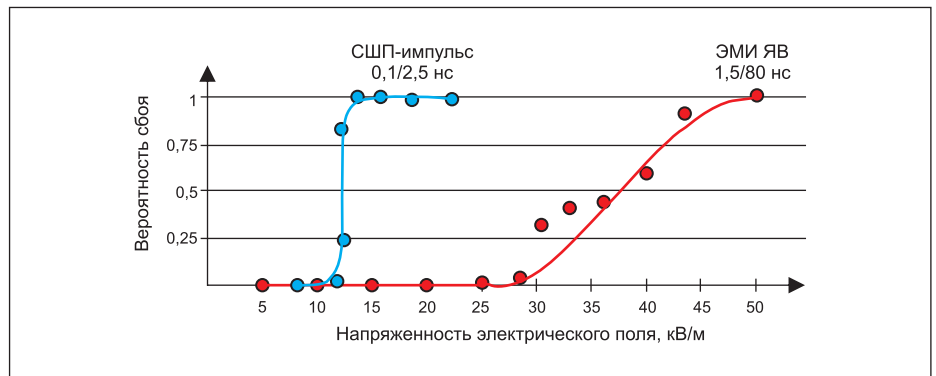
Как можно видеть из приведенного анализа, восприимчивость электронной аппаратуры к ЭМИ ЯВ в очень сильной степени зависит как от разброса параметров компонентов даже одного и того же типа, так и от изменения внешних условий и воздействующих параметров импульса. А это означает, что заранее спрогнозировать степень уязвимости



**Рис. 9.** Данные об уровнях импульсного электрического поля, вызывающего сбои в их работе



**Рис. 10.** Увеличение вероятности сбоя в работе микропроцессоров с переходом от более старого поколения к более новому



**Рис. 11.** Изменение вероятности сбоя в работе платы Rocky-518 HV с процессором Pentium-MMX 233 МГц с изменением частотных параметров импульса

электронной аппаратуры в реальных условиях ЯВ просто невозможно. Отсюда следует еще один вывод о том, что реальные испытания определенного типа электронного устройства на испытательном стенде, симулирующем ЭМИ ЯВ, могут быть примени-

мы и их результаты интерпретированы лишь для конкретного испытуемого образца изделия и не могут быть распространены на подобные изделия других типов, даже схожих с испытуемым по своим параметрам и выполняемым функциям.

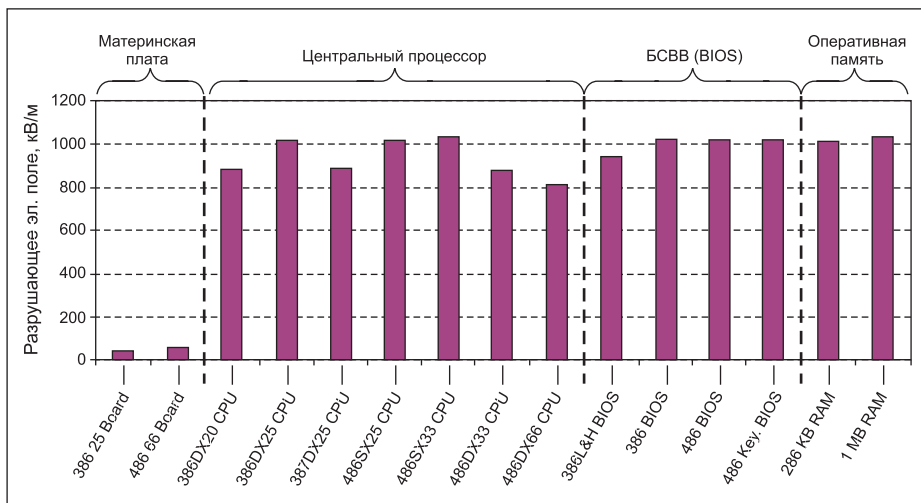


Рис. 12. Амплитуды импульсов разрушающего электрического поля (7,5/180 нс) для различных частей персонального компьютера

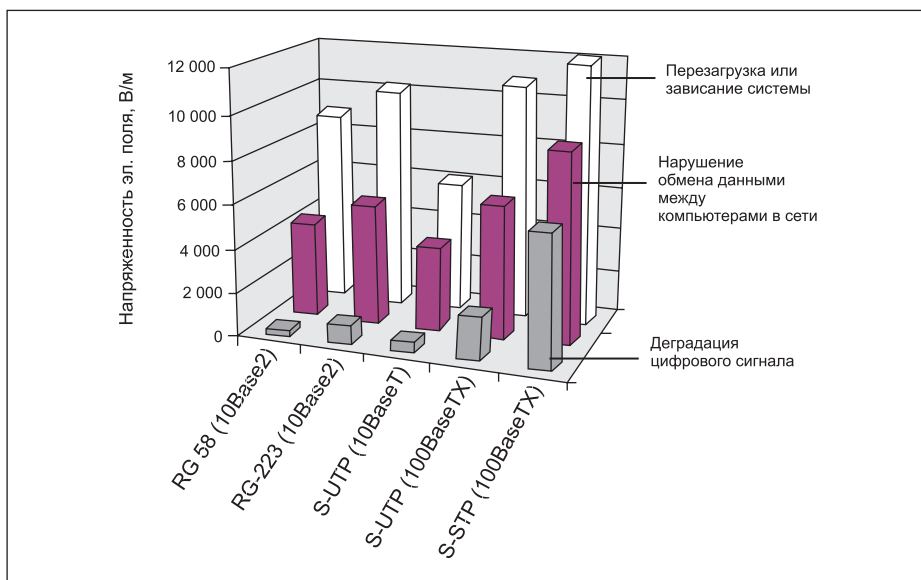


Рис. 13. Уровень восприимчивости (сбои в работе) простейшей компьютерной сети для разной конфигурации сети и используемых кабелей

ное поле ЭМИ ЯВ. Проблема заключается в том, что это поле индуцирует значительные напряжения в протяженных проводах и кабелях, и уже они, будучи подключенными к электронной аппаратуре, представляют для нее серьезную угрозу. Поэтому основные усилия по защите электронного оборудования от ЭМИ ЯВ должны быть направлены на предотвращение проникновения в нее импульса высокого напряжения контактным способом, через подключенные кабели. ■

## Литература

1. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Critical National Infrastructures, 2008.
2. Yee J. H., Orvis W. J., Martin L. C. Theoretical Modeling of EMP Effects in Semiconductor Junction Devices. Report AFWL-TR-82-91. Air Force Weapon Laboratory, Kirtland Air Force Base, 1983.
3. Camp M., Garbe H. Susceptibility of Personal Computer Systems to Fast Transient Electromagnetic Pulses // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. Vol. 48. No. 4.
4. Camp M., Garbe H., Nitsh D. Influence of the Technology on the Destruction Effects of Semiconductors by Impact of EMP and UWB Pulses. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis, USA, 19-23 Aug. 2002.
5. Wunsch D. C., Bell B. R. Determination Failure Levels of Semiconductor Diodes and Transistors Due to Pulse Voltages // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1968. Vol. 15. Iss. 6.
6. Nitsh D., Camp M., Sabath F., Haseborg J. L., Garbe H. Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004. Vol. 46. No. 3.
7. Van Keuren E. Effects of EMP Induced Transients on Integrated Circuits. — IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. San Antonio, TX, USA, 7-9 Oct. 1975.
8. Jenkins C. R., Durgin D. L. An Evaluation of IC EMP Failure Statistic // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1977. Vol. 24. No. 6.
9. Moore G. E. Cramming More Components onto Integrated Circuits. Electronics, April 19, 1965.

Еще один важный вывод, который можно сделать из проведенного выше анализа, заключается в том, что устойчивость от-

дельно взятых электронных компонентов к импульсу внешнего электрического поля очень высока и намного превышает реаль-