

# Россия и ВТО: что ждёт нашу электронику

**Александр Майстренко (Москва)**

«Больной скорее мёртв, чем жив!» – «Нет, больной скорее жив, чем мёртв!», – спорили персонажи известной сказки у постели больного. Так и мы спорим о российской электронике, особенно в преддверии вступления страны в ВТО. Дадим слово людям, своими руками создающим нашу электронику, а желающих высказаться приглашаем на страницы журнала.

Длительный переговорный процесс, предваряющий вступление России в ВТО, рано или поздно закончится. Будут достигнуты соглашения о пошлинах на кур и боинги, которых американцам девать некуда, на китайскую чёрную икру, которой у китайцев не было и нет, на немецкие автомобили, французские сыры, итальянское вино... и всё это изобилие «стремительным домкратом» хлынет на наш рынок. Скорее всего, правительство даже оградит наших дорогих (их деятельность дорого нам обходится) банкиров и страховщиков, ободравших ещё не всё российское население, от нашествия их западных коллег и позволит им доделывать начатое. Возможно, не сможет защитить фермеров, промышленных рабочих, шахтеров – тех, кому с властью поделить нечем, – и они пополнят ряды безработных. Так или иначе, наша страна и наша жизнь вскоре изменятся, и, конечно, хочется знать, что же ждёт нас – людей, так или иначе связанных с электроникой.

Просматривая подборку материалов прессы, связанную с проблемой вступления России в ВТО, я заметил, что слово «электроника» в ней практически не попадает, а если и попадает, то речь в статье о чём угодно, только не о ней. Даже в статье «ВТО – крупная игра крупных игроков» Валерия Дшхуняна, генерального директора ОАО «Российская электроника», на сайте <http://www.wto.ru/>. Исключением явилась статья «Прогноз погоды на рынке электроники от Бориса Рудяка», опубликованная в журнале Chip News № 5, 2004 г. Автор – ге-

неральный директор крупной фирмы, занимающейся дистрибуцией электронных компонентов. Хороший язык, прекрасное знание рынка, интересные мысли. Но не со всеми из них можно согласиться.

Цитирую: «Компаниям, которые работают в области высоких технологий, вступление в ВТО крайне невыгодно. Многие компании просто не выдержат новых условий рынка. Они не успели ещё достаточно вырасти и не имеют возможности противостоять зарубежным конкурентам. Как только вступление в ВТО произойдёт, зарубежным компаниям будет намного легче конкурировать с российскими фирмами, чем сегодня».

Так ли беспомощны российские компании, работающие в области электроники, как об этом заявляется? Неужели они окажутся беззащитными перед лицом надвигающихся западных и восточных монстров? Лучше спросить об этом их самих. Я попросил руководителей нескольких российских компаний ответить на следующие вопросы:

- *Сколько лет ваша фирма существует на рынке, численность сотрудников, какую продукцию фирма производит, какую долю рынка занимает продукция?*
- *Есть ли у вас конкуренты среди отечественных и зарубежных компаний? Как вам удаётся выигрывать конкурентную борьбу?*
- *Что, по вашему мнению, ждёт российскую электронику после вступления в ВТО? Как вступление в ВТО может отразиться на положении вашей компании?*

Ниже привожу их ответы.

**Леонид Александров, менеджер  
ЗАО L-Card**

- Нашей фирме около 15 лет. Работает около 100 сотрудников. Мы разрабатываем и производим лабораторные и промышленные системы компьютерного сбора данных, управления технологическими процессами. Что касается доли рынка – точно сказать трудно, но, похоже, немалая – наша продукция используется более чем в сотне городов, целым рядом министерств и ведомств, например ракетно-космическим агентством.
- Конкуренты у нас, конечно, есть. Наше преимущество перед зарубежными компаниями, в первую очередь, – цена. Во вторую (не последнюю!) очередь – эффективная бесплатная техническая поддержка и консультативная служба, а также отработанная система ремонта. Получить всё это у иностранных компаний, имеющих очень небольшие объёмы продаж в России, весьма проблематично, им просто невыгодно этим заниматься. Они полагают, что продают «идеальную» продукцию, которая в обслуживании не нуждается (да и невыгодно это – обслуживать 10...20 изделий). А российский потребитель, похоже, это понял. С отечественными конкурентами мы отчасти расходимся за счёт того, что сегменты рынка, где мы действуем, почти не перекрываются. А отчасти из-за того, что цена (в пересчёте на один канал преобразователя данных) у нас несколько ниже, чем у конкурентов, благодаря эффективным технологиям и наличию собственной производственной базы. Впрочем, боюсь, что тут мои ответы далеко не оригинальны.
- Последний вопрос, на мой взгляд, адресован аналитикам несколько более высокого уровня. В общем, я лично совершенно не понимаю, как в достаточно строго организованную международную систему может

быть интегрировано наше тотальное беззаконие и произвол. А заявления, что, дескать, сперва вольёмся, а потом уж начнем жить и работать по закону, звучат в лучшем случае наивно и безграмотно. А поскольку ни того, ни другого не приходится ожидать от людей, делающих эти заявления, остаётся вариант циничной демагогии. К сожалению, это верно не только при рассмотрении перспектив вступления в ВТО. Впрочем, именно полное игнорирование законов и может обеспечить демпфирование жёстких требований ВТО на внутреннем рынке.

#### **Константин Корнеев, директор ООО «Фаствел»**

- «Фаствел» существует 6 лет, численность сотрудников – около 100 человек. Направления деятельности: разработка и производство электронного оборудования для автоматизации технологических процессов (доля рынка на 2003 г. около 4%) и контрактное производство электронного оборудования (доля рынка около 10%).
- Конкуренты, конечно же, есть. На рынке средств автоматизации это в основном зарубежные компании-производители. Чем мы лучше? Потенциал наших разработчиков, программистов и технологов в этой области, на мой взгляд, выше, чем у зарубежных коллег. Мы разрабатываем изделия с учетом специфики российского рынка, в большинстве случаев учитывая в техническом задании на разработку требования конечного потребителя продукции. Внедрение изделий часто осуществляется при непосредственном участии специалистов «Фаствел». Изделия оперативно модифицируются с учётом опыта того или иного внедрения. Техническая поддержка, сервисное и гарантийное обслуживание осуществляется на территории России. В отдельных случаях с заказчиком работают напрямую разработчики изделия. Основные конкуренты на рынке контрактного производства – российские фирмы. Рынок развивается очень динамично. Сложность производимых устройств растёт с каждым годом. И если ещё три-четыре года назад высокотехнологичным считалось производство с одним автоматом

по установке микросхем типа TOPAZ, то сейчас требования к составу оборудования и квалификации персонала совершенно другие. Производство «Фаствел» на сегодняшний день по совокупности таких показателей, как техническая оснащённость, квалификация персонала, опыт серийного производства сложных изделий и контроль качества, – лучшее в России. Это и есть наше конкурентное преимущество.

- Про всю российскую электронику я говорить не могу – не знаю. В тех сегментах рынка, в которых работает «Фаствел», ничего кардинального, на мой взгляд, не произойдёт. Крупные иностранные контрактные сборщики, которые якобы должны появиться в России после вступления в ВТО, уже либо приняли стратегические решения о работе в России, либо работают в России. Но поле деятельности таких компаний, а это, прежде всего, массовая сборка на территории России изделий мощных мировых брендов (Nokia, Motorola, HP и др.), пока мало пересекается с полем, на котором работают российские компании. Пока нам нечего делить. На сегодняшний день существует одна серьёзная опасность со стороны крупных иностранных конкурентов – переманивание персонала, но, на мой взгляд, это мало связано с вступлением в ВТО, поскольку, повторюсь, они уже здесь и уже этим занимаются.

#### **Ярослав Петричкович, директор ГУП НПЦ «ЭЛВИС»**

- Наша фирма существует на рынке с 1990 года. Работает 120 человек. Фирма производит разработки по двум направлениям:
  - *первое* – проектирование, изготовление и поставка сверхбольших интегральных схем типа «система на кристалле» на основе собственной программируемой платформы МУЛЬТИКОР для перспективных электронных систем (радарная обработка, обработка изображений, распределённые системы управления, связь нового поколения и т.д.);
  - *второе* – разработка и внедрение новых технологий безопасности (системы биометрической идентификации, системы видеонаблюдения с компьютерным зрением, ра-

диотранспондерные системы, коммерческие радиолокаторы).

- В области технологий безопасности по ряду позиций мы значительно опережаем мировой уровень (системы видеонаблюдения с компьютерным зрением, системы биометрической идентификации) или находимся на этом уровне (радарные системы, радиотранспондерные системы). В области проектирования кристаллов мы вынуждены конкурировать с такими мощными фирмами, как Texas Instruments, Analog Devices, Motorola. Нам пока трудно вытеснить приборы этих компаний с коммерческого рынка, но в области специальных и оборонных применений мы ставим вполне реальную задачу со своими микросхемами серии «Мультикор» захватить большую долю рынка в области микроконтроллеров и процессоров обработки сигналов. Ставим перед собой задачу конкурировать и в области коммерческих микросхем и систем на их основе. Соответствующие проекты уже «на выходе». К сожалению, конкуренция со стороны отечественных дизайн-центров в нашей области ощущается мало. Выигрывать конкуренцию нам помогает коллективный талант предприятия, как в области управления проектами, так и в области маркетинга. Немаловажно, что нам пришлось «выплывать» в первой половине 90-х практически без помощи государства. Мы научились сами зарабатывать деньги и вкладывать их в собственные проекты. Это было очень тяжело, но зато мышцы наши окрепли и взор обострился. Полагаю, что фирмы, полностью защищённые государственным зонтиком от рынка, «не жильцы». Но и осуществить мощные проекты в области электроники без помощи государства тоже невозможно. По крайней мере, опыт многих стран говорит об этом. Нужно вырабатывать технологии «смешанного» инвестирования, прежде всего в инфраструктуру электроники.
- Трудно оценить последствия вступления России в ВТО для различных отраслей экономики. Скорее всего, эти последствия будут очень разными. Что касается электроники, то они будут скорее положительными. Просто потому, что хуже

быть уже не может, так как наш рынок и так полностью открыт для зарубежной электроники уже много лет. Вряд ли мы сможем конкурировать с китайским производственным монстром. Это не удаётся никому в мире. Поэтому весь электронный ширпотреб в обозримом будущем будет поставляться из Китая. И вступление в ВТО никак не изменит эту ситуацию. Зато может облегчить интеграционные процессы в тех областях электроники, где мы вполне конкурентоспособны, например, в области проектирования сложных электронных систем, микросхем, программного обеспечения. Вполне возможно и производство «немассовых» электронных систем, и объёмы такого производства могут измеряться миллиардами долларов. Просто сейчас существует такая мощнейшая оборонительная система для любых экономических контактов с зарубежными странами, что это наталкивает на мысль, что железный занавес разобрали только в газетах. Например, чтобы ввезти по контракту микросхемы на \$200, я должен предоставить в таможенную службу 26 документов (!), а чтобы вывезти свою продукцию за рубеж – ещё больше. Да какая же нормальная экономика это может выдержать? Может быть, что-то изменится после вступления страны в ВТО.

#### **Эдуард Поляков, генеральный директор холдинга «Полар»**

- Холдинг «Полар», основанный в 1992 году, является одним из ведущих производителей аудио-/видео- и бытовой техники для российского потребителя. Компания выпускает под брендом POLAR телевизоры, DVD-проигрыватели, домашние кинотеатры, пылесосы, микроволновые печи, стиральные машины. Производство продукции осуществляется на схемотехнике и технологиях, разработанных конструкторами компании «Полар», с применением импортных комплектующих. В настоящее время продажа продукции «Полар» осуществляется во всех регионах России, в которых работают более 300 сервисных центров компании. В 2003 г. доля «Полар» среди российских марок телевизоров достигла 18% и продолжает стабильно увеличиваться. В резуль-

тате активизации маркетинговой и коммерческой деятельности объём продаж телевизоров «Полар» по сравнению с 2002 г. вырос вдвое, а доля бренда «Полар» среди отечественных марок телевизоров увеличилась с 10% до 18%, тем самым выведя компанию на второе место. Ни одному из российских производителей электроники в 2003 г. не удалось достичь столь высоких темпов роста. В январе 2003 г. холдинг «Полар» запустил собственное производство в г. Черняховске (Калининградская обл.). Общая площадь завода составляет свыше 6 тыс. кв. м., в 2004 г. планируется увеличение. Завод «Полар» – это мощное современное предприятие, позволяющее осуществлять полный цикл операций по производству теле-, видео- и бытовой техники. Суммарная мощность всех конвейеров позволяет производить до 2,5 млн. единиц техники в год.

- В категории аудио-/видеотехники ближайшими конкурентами «Полар» являются марки «Горизонт», «Рубин», Rolsen, «Сокол», Vestel. Конкурентами являются также марки LG и Samsung, но их цены на аналогичные модели примерно на 20...30% выше цен на технику «Полар». В категории бытовой техники (пылесосы и микроволновые печи) основными конкурентами являются марки LG и Samsung. Основным конкурентным преимуществом техники «Полар», безусловно, является оптимальное соотношение цена/качество: изначально компания была нацелена на производство надёжной техники по доступной цене и продолжает делать упор на этом, что подтверждают отзывы покупателей, рекомендации экспертов и представителей сервисных центров. Сильными сторонами компании «Полар» являются наличие собственного завода с высокой проектной мощностью, собственного научно-технического департамента, а также сильная развитая дилерская сеть во всех регионах России. Знание тенденций российского и мирового рынка позволяет своевременно расширять ассортимент продукции.
- В нашей стране давно сложилась ситуация, в которой российский производитель реально не защищён. Импорт комплектующих,

которые в России не выпускаются, но которые необходимы для отечественного производства, затрудняет бесчисленное множество приказов и предписаний, так называемых «информационных писем», зачастую противоречащих таможенному законодательству. Например, приказной характер носят так называемые «Рекомендательные письма о таможенной стоимости груза», согласно которым, к примеру, телевизоры с диагональю 21" можно ввезти на территорию РФ по \$66, тогда как кинескопы – по \$55. Получается, на готовые изделия стоимость, согласно приказу, занижена, на комплектующие – завышена. И механизм обжалования стоимости ввозимых изделий в этих письмах не прописан. Вступление в ВТО сыграет положительную роль в том случае, если для всех участников рынка будут сформулированы чёткие правила игры, одинаковые для всех. И выход в международное правовое пространство может этому способствовать. Безусловно, существует ряд отраслей, которые ещё не готовы к конкуренции на мировом рынке, – эти отрасли необходимо защитить при вступлении в ВТО. Что касается российской электроники, то на этом рынке и сейчас наблюдается острая конкурентная борьба. Тем не менее, «Полар» давно и успешно конкурирует с западными производителями, а вступление в ВТО позволит лишь повысить конкурентоспособность нашей продукции, укрепить наши позиции в России и выйти на международные рынки.

Подведем итоги. Менее всего руководители российских электронных производств озабочены перспективой острой конкурентной борьбы, которая якобы должна развернуться на российском рынке после вступления в ВТО. Конкурировать они умеют как с отечественными, так и с зарубежными производителями, которые, оказывается, давно уже здесь. Наши предприятия заняли свои производственные ниши и определили стратегии развития производства, дающие им конкурентные преимущества перед иностранными компаниями. Более того, некоторые из них занимают не оборонительную, а наступательную позицию, рассматривая вступление в

ВТО как возможность выхода на международный рынок. Гораздо больше проблем создает наше несурзное законодательство, и производители возлагают надежды на его изменение в связи со вступлением в ВТО.

На вопрос «Российской Газеты»: «Что нам даст вступление в ВТО с точки зрения доступа на рынок товаров и услуг?» директор Департамента торговых переговоров Минэкономразвития Максим Медведков ответил: «Я остановлюсь на тех секторах, которые сейчас во многом закрыты для российских экспортеров и где Россия может занять

серьезное место, используя свой человеческий потенциал. Это услуги по осуществлению космических запусков, образовательные услуги, компьютерные услуги, услуги, связанные с обогащением урана. Это все очень технологичные виды деятельности, и немногие страны способны их выполнять» (<http://www.rg.ru/2004/08/10/vto.html>).

Российская электроника также имеет значительный интеллектуальный и технологический потенциал и готова к достойной конкурентной борьбе. Что же касается стремления дистрибьюторов «затормозить вступле-

ние России в ВТО хотя бы на два-три года», то оно продиктовано, скорее всего, обеспокоенностью неповоротливого российского бизнеса скорым появлением на нашем рынке их более расторопных западных и восточных коллег, способных предложить более низкие цены на электронные компоненты. Думаю, российская электроника переживёт уход с рынка как слабых дистрибьюторов, так и слабых, не сумевших измениться производителей. Оставшиеся смогут по достоинству оценить открывающиеся перспективы развития. ©

## Новости мира News of the World Новости мира

### Microsoft нуждается в тысячах сотрудников

Хорошие финансовые показатели, которые Microsoft продемонстрировала в последнем квартале, дали возможность компании объявить о своих планах по набору 6...7 тысяч новых сотрудников в течение ближайшего года. Первоначально планировалось набрать несколько меньшее количество людей, но дополнительный доход дал возможность увеличить число вакансий примерно на одну тысячу. Около 3...3,5 тысяч сотрудников будут набраны в США. Остальные рабочие места планируется создать за пределами страны.

В настоящий момент под гордым разноцветным четырёхсекционным знаменем трудится 57 086 человек. Эта цифра существенно выше прошлогодней, когда в Microsoft работали 54 923 сотрудника. Принятые за этот период две тысячи человек примерно поровну распределились между США и другими странами, где компания имеет свои подразделения. В этом году за пределами страны планируется набрать около трёх тысяч сотрудников, так что можно сделать вывод о том, что часть рабочих мест придётся и на Россию.

[www.zdnet.com](http://www.zdnet.com)  
[www.computery.ru](http://www.computery.ru)

### HD-DVD приобретает сторонников

Война оптических форматов будущего поколения, которую ведут сторонники технологий Blu-Ray и HD-DVD, вовлекает всё новых участников. На начальном этапе казалось, что Blu-Ray просто обречён на победу, однако в последнее время всё больше появляется причин верить в то, что HD-DVD вполне может стать диском завтрашнего дня. Недавно японское подразделение компании Microsoft проинформировала общественность о том, что

операционная система Windows Longhorn будет поддерживать работу с приводами и носителями именно HD-DVD. О поддержке Blu-Ray ничего сказано не было. Это, конечно, сильный удар для сторонников Blu-Ray, ведь большинство пользователей стремится использовать те возможности, которые им предоставляет операционная система, вместо того чтобы лазить по Сети в поисках драйверов и софта для устройств, поддержки которых ОС по умолчанию не предлагает. В таких условиях выбор Microsoft вполне может оказаться решающим.

Напомним, что первые коммерчески доступные приводы HD-DVD должны появиться на рынке в следующем году. Однако никаких комментариев по поводу возможных цен на эти устройства получить пока невозможно. Всё будет определяться тем уровнем успеха, которого достигнет к следующему году формат Blu-Ray. В любом случае ценовая война неизбежна.

<http://itc.ua>

### МЭК сформировала рабочую группу для стандартизации топливных элементов

Международная электротехническая комиссия (МЭК), организация, устанавливающая стандарты для электронных приборов, потребительских товаров и коммуникационного оборудования, заявила о создании по предложению Японии рабочей группы в составе технического комитета (TC105) для рассмотрения промышленных стандартов на топливные элементы, применяемые в портативных устройствах, включая ноутбуки и мобильные телефоны. Производители во всём мире объявили о существенном прогрессе в разработке компактных топливных элементов, которые вскоре станут альтернативными

источниками энергии для электронных устройств. МЭК должна установить международные стандарты на эти топливные элементы и топливные картриджи для них.

Представители шестнадцати стран – членов МЭК с правом голоса, включая США, Японию, Канаду, Францию и Англию, договорились создать рабочую группу WG10 (Working Group 10) для обсуждения вопросов стандартизации и взаимозаменяемости. WG10 должна ознакомить производителей и потребителей электроники во всём мире со стандартами совместимости, когда топливные элементы станут жизнеспособными альтернативными источниками энергии для портативных устройств.

WG10 объединит усилия экспертов, которые должны установить общие руководящие принципы по спецификациям для топливных элементов и картриджей к 2007 г. Признанный промышленный стандарт на топливные элементы облегчит пользователям обращение со стандартизированными картриджами, подходящими к любому типу электронных устройств независимо от их производителя. Руководителем рабочей группы назначен др. Фумио Уэно (Fumio Ueno), сотрудник корпорации Тошиба.

[www.toshiba.com/taec](http://www.toshiba.com/taec)

### ASUS выходит на рынок LCD-мониторов

Недавно стало известно о запуске компанией ASUS нового бренда – ARISTO. Именно такое название получила их первая линейка LCD-мониторов с рекордным временем отклика 16 нс. ASUS ARISTO PG17 позиционируется как монитор для игроков, ASUS ARISTO PD17 – офисный; ASUS ARISTO PV17 – домашний с опциональной платой TV.

[www.3dnews.ru/news](http://www.3dnews.ru/news)

# Выбор ключевых транзисторов для преобразователей с жёстким переключением

Александр Полищук (Москва)

Существует диапазон мощностей и частот преобразования, в котором трудно отдать предпочтение MOSFET или IGBT. Но похоже, что новые классы MOSFET в ближайшие годы отвоюют спорную территорию у IGBT. В статье приводится методика быстрого оценочного расчёта потерь в инверторах и оценка эффективности применения перспективных транзисторов.

За последнее десятилетие MOSFET- и IGBT-транзисторы надёжно зарекомендовали себя в качестве основных ключевых приборов для преобразовательной техники. В литературе [1...3] достаточно подробно рассматривался вопрос выбора тех или иных приборов в зависимости от величин рабочих частот, токов, напряжений и режимов работы транзисторов. Рисунок 1 иллюстрирует общепринятое разграничение областей применения MOSFET и IGBT в жёстком режиме переключения исходя из достижимых для коммерческого использования основных электрических характеристик.

При напряжениях питания до 250 В и на частотах переключения свыше 100 кГц доминирующую роль играют MOSFET-транзисторы, на частотах до 30 кГц и напряжении 300...1200 В предпочтение отдается IGBT, при этом диапазон 250...800 В, 30...150 кГц оказывается спорным с позиции эффективности использования того или иного прибора. Это связано с тем, что у IGBT существенную роль начинают играть динамические потери, а у MOSFET – статические, обусловленные слишком большой величиной сопротивления в открытом состоянии.

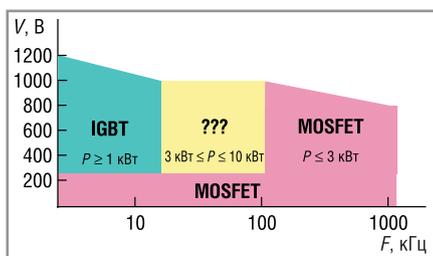


Рис. 1. Разграничение областей применения MOSFET и IGBT

Ещё один важный фактор, влияющий на выбор ключевых приборов, связан со спецификой работы рассматриваемых преобразователей на индуктивную нагрузку и заключается в необходимости установки антипараллельных диодов, характеристики обратного восстановления которых вносят значительный вклад в динамические потери.

За последние годы ведущие производители компонентов для силовой электроники предприняли значительные усилия как по улучшению характеристик традиционных полупроводниковых приборов, так и по разработке новых изделий, позволяющих разработчикам решать проблемы повышения эффективности преобразователей на качественно новом уровне. Это заставляет пересмотреть традиционные решения вопроса выбора ключевых транзисторов.

Ниже будут рассмотрены характеристики современных силовых приборов и предложена методика выбора исходя из соотношения «эффективность/стоимость».

## MOSFET-ТРАНЗИСТОРЫ

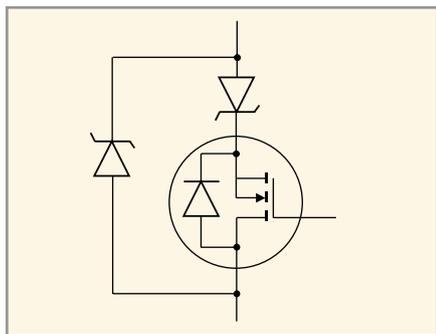
Появление в 70-х годах высоковольтных полевых транзисторов с вертикальной структурой произвело переворот в схемотехнике и характеристиках источников вторичного электропитания (ИВЭП). Высокие скорости переключения, отсутствие насыщения, простота управления затворами, устойчивость к перегрузкам по току и скорости нарастания напряжения позволили проектировать ИВЭП с частотами преобразования до сотен килогерц и удельными мощ-

ностями свыше 1000 Вт/дм<sup>3</sup>. В то же время по статическим потерям MOSFET значительно проигрывали биполярным транзисторам и тиристорам, что ограничивало их применение в мощных преобразователях. Поэтому основные усилия фирм-производителей были направлены на уменьшение величины сопротивления в открытом состоянии и увеличение максимального напряжения сток-исток.

В 1998 году компания Infineon Technologies представила новый тип MOSFET-транзисторов под торговой маркой CoolMOS™ с напряжением сток-исток в закрытом состоянии 600 В и 800 В. В этих транзисторах удалось снизить сопротивление в открытом состоянии более чем в 5 раз по сравнению с обычными полевыми транзисторами с вертикальной структурой. Помимо сверхнизких статических потерь, CoolMOS™-транзисторы обеспечивают более высокую, чем у MOSFET, скорость переключения благодаря меньшей площади кристалла и, как следствие, снижают потери переключения.

Общим недостатком полевых транзисторов с вертикальной структурой является наличие паразитного антипараллельного диода с неудовлетворительными характеристиками обратного восстановления, что очень усложняет их использование в преобразователях с рекуперацией реактивной энергии (с «жёстким переключением», индуктивной нагрузкой, в резонансных инверторах [4] и т.п.). Это заставляет производителей разрабатывать технологии, позволяющие улучшить характеристики встроенного диода. Примером может служить семейство HiPerFET™-транзисторов компании IXYS.

Второй подход к решению данной проблемы заключается в блокировке паразитного диода последовательным с транзистором диодом Шоттки и подключении встречно-параллельно ULTRAFast- или SiC-диода (рис. 2).



**Рис. 2. Встречно-параллельное подключение ULTRAFast- или SiC-диода**

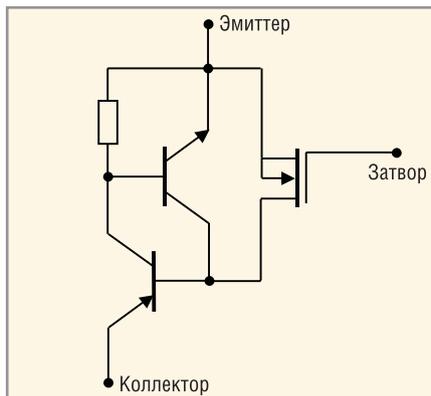
Приборы, реализующие этот принцип, выпустила компания Advanced Power Technology. Однако наличие последовательного диода резко увеличивает статические потери по сравнению с одиночным MOSFET.

Для сравнения в таблице 1 приведены характеристики новых приборов с классификационными напряжениями 600 В и 800 В и постоянным током стока до 55 А, изготовленных по различным технологиям.

### IGBT-ТРАНЗИСТОРЫ

Отмеченные выше недостатки полевых транзисторов заставляли производителей силовых полупроводников искать компромиссное решение, позволяющее объединить достоинства MOSFET- и биполярных транзисторов Дарлингтона. В конце 80-х годов прошлого века было создано первое поколение биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), а в начале 90-х – второе и третье поколения IGBT. Эти приборы объединили в себе простоту управления затвором полевого и большие коммутируемые токи биполярного транзисторов.

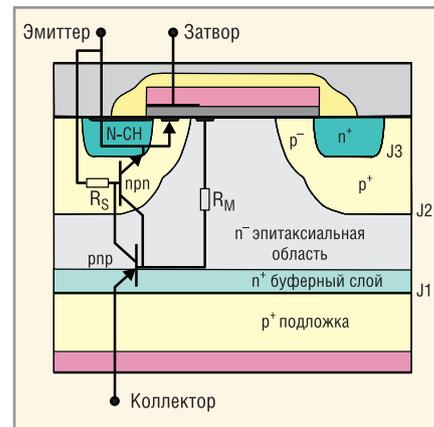
Упрощенно IGBT можно представить как комбинацию биполярного р-п-р-транзистора и MOSFET (рис. 3).



**Рис. 3. IGBT можно представить как комбинацию биполярного р-п-р-транзистора и MOSFET**

Помимо основного р-п-р-транзистора существует паразитная н-р-п-структура, которую делают неактивной путем шунтирования база-эмиттерного перехода слоем металлизации истока. Эти два транзистора образуют четырехслойную р-п-р-п-структуру паразитного тиристора. Суммарное усиление н-р-п- и р-п-р-транзисторов должно быть меньше 1. Однако с повышением температуры их усиление возрастает, поэтому при очень большом токе коллектора из-за локального нагрева их суммарное усиление может превысить 1 и привести к открыванию н-р-п-транзистора. При этом паразитный тиристор отпирается и не реагирует на изменение напряжения на затворе, что может привести к выходу из строя IGBT. Этот эффект называют статическим защелкиванием. Чрезмерно высокие скорости нарастания коллекторного напряжения и тока при выключении также могут привести к открыванию н-р-п-транзистора. Это эффект динамического защелкивания, который приводит к уменьшению области безопасной работы IGBT.

В отличие от MOSFET, у IGBT отсутствует интегральный паразитный обратный диод, что позволяет при не-



**Рис. 4. Структура PT IGBT**

обходимости использовать внешний антипараллельный ULTRAFast- или SiC-диод.

Структурно IGBT делятся на PT (punch-through) и NPT (non-punch-through). У PT-приборов дополнительно имеется n+-буферный слой между р+-подложкой и п-эпитаксиальной областью (рис. 4).

Благодаря его наличию увеличивается скорость рекомбинации дырок, что приводит к увеличению скорости выключения транзистора и уменьшению времени и тока рассасывания, а также усиления р-п-р-транзистора. У NPT IGBT n+-буферный слой отсутствует, что, с одной стороны, приводит к уменьшению прямого падения напряжения коллектор-эмиттер, но, с другой стороны, увеличивает время рассасывания и, соответственно, потери выключения на высоких частотах. PT IGBT, в отличие от более «медленных» NPT приборов, обладают низкой устойчивостью к короткому замыканию и поглощению большой лавинной энергии. По скорости переключения PT IGBT сравнимы с мощными MOSFET-транзисторами, поэтому усилия фирм-производителей направлены на снижение прямых потерь проводимости и увеличе-

**Таблица 1. Характеристики транзисторов с напряжениями до 800 В и постоянным током стока до 55 А**

Тип (фирма)	Технология	$U_{си\ max}$ , В	$I_c\ max$ , А, при 25°C	$R_{си}$ , Ом, при 25°C	$t_r/t_f$ , нс	$t_{гр}$ , нс	$Q_{гр}$ , мкКл
APT60M80JVR (Advanced Power Technology)	POWER MOS V® Standard MOSFET	600	55	0,080	25/31	937	29
APT8011JLL (Advanced Power Technology)	POWER MOS 7® Standard MOSFET	800	51	0,110	23/19	1000	34
IXFK52N60Q2 (IXYS)	HiPerFET™	600	52	0,115	13/8,5	250	1
IXFN50N80Q2 (IXYS)	HiPerFET™	800	50	0,150	25/13	300	1,1
APT47N60BC3 (Advanced Power Technology)	CoolMOS™	600	47	0,070	27/8	580	23
IXKN45N80C (IXYS)	CoolMOS™	800	44	0,074	15/10	855	30
APTC60HM70SCT (Advanced Power Technology)	CoolMOS™+SiC	600	39	0,070 (1,1 В*)	10/40	0	0,028
IXKF40N60SCD1 (IXYS)	CoolMOS™+FRD	600	38	0,060 (0,9 В*)	30/10	70	0,53

\*Указано сопротивление в открытом состоянии плюс прямое падение напряжения на последовательном блокирующем диоде Шоттки.

ние устойчивости к скорости нарастания напряжения. Современные PT IGBT, например из производственной линейки PowerMOS7T компании Advanced Power Technology, благодаря технологии снижения толщины p-эпитаксиальной области имеют величину прямого падения напряжения не больше, чем у NPT-приборов.

В таблице 2 приведены характеристики современных высокоскоростных PT и NPT IGBT с классификационными напряжениями 600 В и 1200 В, постоянным током коллектора до 50 А и антипараллельным диодом (FRD).

**Выбор ключевых транзисторов**

В рамках данной статьи интерес представляет анализ эффективности применения того или иного класса ключевых приборов в преобразователях с напряжением питания 300...600 В,

мощностью до 10 кВт, с частотами преобразования свыше 50 кГц. Такая задача относится к большой группе аппаратуры, включающей установки для индукционного нагрева средней мощности (пайка и закалка), источники бесперебойного питания, прецизионные системы управления электродвигателями и т.п.

Выбор того или иного прибора в общем случае определяется конкретными электрическими характеристиками системы в целом. При этом критерием оптимальности в первом приближении можно считать минимизацию суммарных потерь при заданных параметрах питания и мощности нагрузки при максимально допустимом увеличении стоимости преобразователя.

Для оценки величин потерь в преобразователе, работающем в «жестком» режиме, будем считать, что за время

открытого состояния транзистора ток, протекающий через него, остаётся приблизительно постоянным, скорость нарастания напряжения при выключении определяется величиной  $t_f$ , коэффициент заполнения равен 0,5.

Мощности статических потерь определяются выражениями:

- для MOSFET

$$P_{st\_M} = \frac{1}{2} I_{sw}^2 R_{on}, \quad (1)$$

- для MOSFET по схеме, представленной на рис. 2,

$$P_{st\_MD} = \frac{1}{2} I_{sw}^2 R_{on} + \frac{1}{2} U_d I_{sw}, \quad (2)$$

- для IGBT

$$P_{st\_I} = \frac{1}{2} U_{sat} I_{sw}, \quad (3)$$

где  $I_{sw}$  – ток, протекающий через транзистор,  $U_{sat}$  – прямое падение на-

**Таблица 2. Характеристики современных высокоскоростных PT и NPT IGBT с напряжениями до 1200 В и постоянным током коллектора до 50 А**

Тип (фирма)	Технология	$U_{кз\ max}$ , В	$I_{к\ max}$ , А	$U_{кз\ нас}$ при 125°C, В	$t_r/t_f$ , нс	$E_{tot}$ , мДж	$Q_{гр}$ , нКл
APT30GP60BSC (Advanced Power Technology)	POWER MOS 7® PT IGBT + SiC	600	49 при 110°C	2,1	17/55	0,50	28
APT30GP60BDF1 (Advanced Power Technology)	POWER MOS 7® PT IGBT + FRD	600	49 при 110°C	2,1	18/46	0,51	77
IXGK50N60C2D1 (IXYS)	HiPerFAST™ PT IGBT + FRD	600	50 при 110°C	1,8	25/48	2,18	560
STGY40NC60VD (ST Microelectronics)	PowerMESH™ NPT IGBT + FRD	600	50 при 100°C	1,7	17/45	1,05	66
IRGP50B60PD1 (International Rectifier)	NPT IGBT + FRD	600	45 при 100°C	2,6	10/11	0,63	80
APT35GP120B2DF2 (Advanced Power Technology)	POWER MOS 7® PT IGBT + FRD	1200	46 при 110°C	3,0	20/40	1,43	162
APT50GF120JRD (Advanced Power Technology)	NPT IGBT + FRD	1200	50 при 105°C	3,5	178/190	10,8	630
IXDH30N120D1 (IXYS)	NPT IGBT + FRD	1200	38 при 90°C	3,1	70/70	8,0	3300
IRGPS40B120UD (International Rectifier)	NPT IGBT + FRD	1200	40 при 100°C	3,88	39/25	3,05	4800

**Таблица 3. Результаты расчетов величин полных потерь для разных режимов**

Тип	Технология	$P_{sw}$ , Вт	$P_{st}$ , Вт	$P_{гр}$ , Вт	$P_{tot}$ , Вт
$V_0 = 320 В, P_0 = 5 кВт, f_s = 100 кГц$					
APT60M80JVR*	POWER MOS V® Standard MOSFET	24,7	9,0	928,0	961,7
IXFK52N60Q2	HiPerFET™	10,3	12,9	32,0	55,2
APT47N60BC3*	CoolMOS™	22,1	7,9	736,0	766,0
APTC60HM70SCT	CoolMOS™ + SiC (Full-Bridge Module)	25,0	16,1	0,9	42,0
IXKF40N60SCD1	CoolMOS™ + FRD	22,6	13,5	17,0	53,1
APT30GP60BSC	POWER MOS 7® PT IGBT + SiC	26,5	15,8	0,9	43,2
APT30GP60BDF1	POWER MOS 7® PT IGBT + FRD	26,6	15,8	2,5	44,9
IXGK50N60C2D1	HiPerFAST™ PT IGBT + FRD	110,5	13,5	17,9	141,9
STGY40NC60VD	PowerMESH™ NPT IGBT + FRD	54,3	12,8	2,1	69,2
IRGP50B60PD1	NPT IGBT + FRD	33,5	19,5	2,6	55,6
$V_0 = 540 В, P_0 = 10 кВт, f_s = 100 кГц$					
APT8011JLL*	POWER MOS 7® Standard MOSFET	48,0	17,8	1836,0	1901,8
IXFN50N80Q2	HiPerFET™	36,0	24,3	59,4	119,7
IXKN45N80C*	CoolMOS™	48,8	12,0	1620,0	1680,8
APT35GP120B2DF2	POWER MOS 7® PT IGBT + FRD	75,1	27,0	8,8	120,9
APT50GF120JRD*	NPT IGBT + FRD	542,1	31,5	34,0	607,6
IXDH30N120D1*	NPT IGBT + FRD	403,2	27,9	178,2	609,3
IRGPS40B120UD*	NPT IGBT + FRD	152,5	34,9	259,2	446,6

\* Прибор не подходит для данного применения

пряжения на IGBT,  $R_{on}$  – сопротивление MOSFET в открытом состоянии,  $U_d$  – прямое падение напряжения блокирующего диода.

Мощность динамических потерь складывается из трёх составляющих: «жёсткое» переключение при токе  $I_{sw}$ , разряд выходной ёмкости C22 транзистора, заряженной до уровня напряжения питания  $V_0$ , и обратное восстановление антипараллельного диода с зарядом  $Q_{rr}$  и определяется выражениями:

- для MOSFET

$$P_{sw\_M} = \frac{1}{2} I_{sw} V_0 f_s (t_f + t_r) + \frac{1}{2} C_{22} V_0^2 f_s, \quad (4)$$

- для IGBT

$$P_{sw\_I} = \frac{1}{2} f_s E_{tot} + \frac{1}{2} C_{22} V_0^2 f_s + Q_{rr} V_0 f_s, \quad (5)$$

где  $t_r$ ,  $t_f$  – время нарастания и спада тока через транзистор,  $f_s$  – частота преобразования,  $E_{tot}$  – суммарная энергия переключения IGBT.

Полные потери:

$$P_{tot} = P_{st} + P_{sw}. \quad (6)$$

В таблице 3 приведены результаты расчётов величин полных потерь для приведённых выше приборов, работающих в преобразователях с  $V_0 = 320$  В,  $P_0 = 5$  кВт и  $V_0 = 540$  В,  $P_0 = 10$  кВт на частоте  $f_s = 100$  кГц.

На рис. 5 показаны зависимости КПД мостовых инверторов от частоты переключения и мощности при использовании транзисторов IXFK52N60Q2 (HiPerFET™), IRGP50B60PD1 (NPT IGBT+FRD) и модуля APTC60HM70SCT (CoolMOS™+SiC). Хорошо видно, что КПД во всех случаях определяется в основном динамическими потерями. Использование HiPerFET™ и высокоскоростных NPT IGBT-приборов со встроенными FRD на частотах выше 50 кГц даёт приблизительно одинаковый результат. Радикальный выигрыш на высоких частотах получается при использовании CoolMOS™-транзисторов с антипараллельными диодами из карбида кремния, однако стоимость

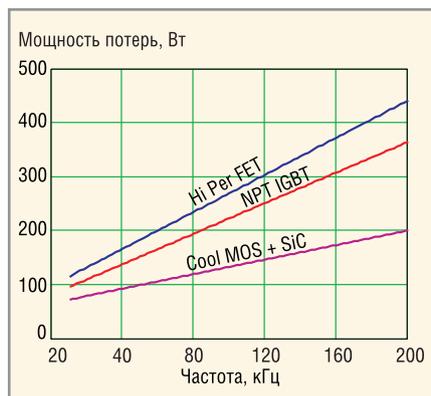


Рис. 5. Зависимость мощности потерь в мостовом инверторе от частоты преобразования для различных типов транзисторов

инвертора при этом значительно возрастает (с 30\$ за четыре IRGP50B60PD1 до 160\$ за модуль APTC60HM70SCT).

Выводы, которые можно сделать из приведённых расчётов, вполне ожидаемы. Во-первых, паразитные диоды стандартных MOSFET и CoolMOS™ не могут быть использованы в качестве рекуперационных при работе с «жёстким» переключением на индуктивную нагрузку; во-вторых, в рассматриваемом режиме работы частоты переключения современных 1200-В NPT IGBT не превышают 20...30 кГц, хотя последние позиционируются как ultrafast-приборы. В то же время хорошие результаты показывают новые HiPerFET™ и комбинированные CoolMOS™-приборы. Вопрос о применении PT IGBT для жёсткого переключения должен решаться в каждом конкретном случае индивидуально, поскольку, как отмечалось выше, они не обладают устойчивостью к поглощению больших величин лавинной энергии. Комбинация CoolMOS™ и SiC-диода Шоттки, как показано на рис. 2, фактически является идеальной альтернативой IGBT для высоких частот переключения. Особенно перспективно, по мнению автора, использование готовых полумостовых и мостовых модулей, в которых уже решены проблемы получения низких тепловых сопротивлений, электрической изо-

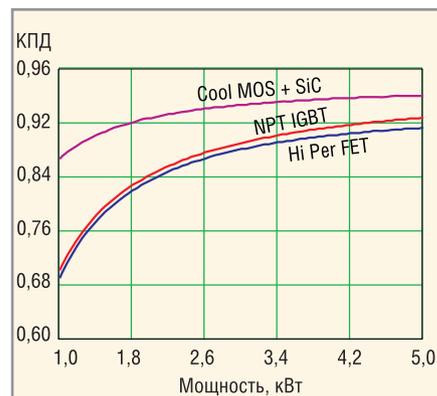


Рис. 6. Зависимость КПД мостового инвертора от мощности

ляции кристаллов и оптимизации конструкции с целью снижения паразитных реактивностей. При этом реальная стоимость мостового инвертора в виде модуля CoolMOS™+SiC и собранного на дискретных HiPerFET™-транзисторах с учётом конструктивных затрат практически одинакова.

Таким образом, возвращаясь к вопросу о применимости IGBT или MOSFET в спорном диапазоне рабочих напряжений и частот (рис. 1), можно с уверенностью утверждать, что в ближайшие несколько лет выбор будет в пользу последних.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Blake C., Bull C. IGBT or MOSFET: Choose Wisely. International Rectifier, 1989.
2. Dubbashi A., Pelly B. IGBT vs. HEXFET Power MOSFETs for Variable Frequency Motor Drives / AN-980. International Rectifier, 1987.
3. Latest Technology PT IGBTs vs. Power MOSFETs. Jonathan Dodge / Advanced Power Technology / PCIM China 2003.
4. Lorenz L., Deboy G., Knapp A., Marz M. CoolMOS™ – a New Milestone in High Voltage Power MOS / Proc. of the ISPSD, 99-102, 1999.
5. Kim H., Jabns T.M., Venkataramanan G. Minimization of Reverse Recovery Effects in Hard-Switched Inverters using CoolMOS™ Power Switches / IEEE IAS Annual Meeting, 2001.



## Новости мира News of the World Новости мира

### Десять миллионов RF-транзмиттеров для беспроводных систем!

Компания Skyworks Solutions достигла рекордных показателей: выпустила свыше 10 млн. FEM (front-end module) – модулей

транзмиттеров для 4-полосных GSM/GPRS-сотовых телефонов. Транзмиттеры собраны в недорогом корпусе MCM, где размещены HBT-усилитель мощности, GaAs PHEMT-детектор и переключатель каналов приёма и передачи. Устройство позволяет значитель-

но сократить число комплектующих и освободить до 40% площади на плате. Модули спроектированы с учетом платформ и стандартов следующего поколения, включая EDGE, 802.11 и 3G WCDMA/UMTS.

[www.skyworksinc.com](http://www.skyworksinc.com)

# Geode, Eden, Crusoe – кто быстрее Intel?

Андрей Гвоздев (Санкт-Петербург)

**С помощью известных тестовых программ автор сравнивает быстродействие и энергопотребление нескольких процессоров, применяемых во встраиваемых системах, с аналогичными характеристиками процессоров фирмы Intel.**

Какому Pentium'у соответствует Geode, Via, Transmeta, – список можно продолжить? Подобные вопросы возникают часто. Иными словами, требуется вычислить рейтинг производительности процессора по отношению к процессорам фирмы Intel.

В былые времена AMD и Cyrix сами любили указывать на корпусах своих процессоров P-рейтинги. Правда, почему-то всегда получалось, что при одинаковой тактовой частоте более дешёвый AMD по P-рейтингу превосходил более дорогой Pentium.

На озвученный в начале статьи вопрос мы, конечно же, ответим. А заодно, пользуясь случаем, сделаем обзор нескольких процессоров, используемых во встраиваемых системах, обозначив особенности архитектуры каждого. Однако давайте сначала определимся с тестами, с методикой измерения вычислительной мощности процессоров. Посмотрите на страницы компьютерных журналов. Они просто переполнены различными тестами, доказывающими преимущества одного процессора над другим. Самое примечательное, что в разных журналах побеждают разные процессоры. И дело здесь не только в ангажементе печатных изданий. Сами тесты позволяют толковать их результаты в довольно широких пределах. К сожалению, универсального стандартизованного метода оценки производительности компьютерных систем пока не существует. Производители компьютеров никак не могут договориться между собой. К тому же самый точный способ определения производительности – это измерение времени исполнения именно вашего приложения, а не синтетических тестовых программ. Вот только возможность прогнать вашу программу на системе, которую предпо-

лагается купить, есть не всегда. Поэтому хочешь – не хочешь, но без бенчмарков не обойтись. В этой связи неправильная интерпретация многочисленных показателей производительности может привести к серьёзным ошибкам. Чтобы не было мучительно больно за бесцельно потраченные деньги, освежим знания, полученные в учебных заведениях, и вспомним, в каких единицах принято сравнивать производительность компьютерных систем.

*MIPS* (Million Instructions Per Second, миллион инструкций в секунду). Испытанные остряки расшифровывают аббревиатуру MIPS как Meaningless Indicator of Processor Speed (бессмысленный индикатор скорости процессора). А технари, не упускающие случая кинуть камень в огород коллег из отдела маркетинга, трактуют MIPS как Marketing's Idea of Processor Speed (в приблизительном переводе – маркетинговый способ измерения скорости процессора.) Ну, а если учесть, что IDEA – это не только идея, но и алгоритм шифрования данных (International Data Encryption Algorithm), то получится ещё более неприятное для MIPS толкование.

Чем же так не угодил MIPS? Ведь были же времена, когда MIPS был чуть ли не стандартом. Но времена эти прошли. Разнообразие архитектур процессоров и операционных систем привело к тому, что от MIPS больше путаницы, чем реальной пользы. Одним из недостатков MIPS является то, что измерение производительности в «инструкциях» для процессоров с разной архитектурой приводит к разным результатам. Классический пример:  $A = B \times C$ . Компилируя это выражение в коды CISC-процессора, получим одну-единственную команду, а в коды RISC-процессора – четыре. Если

время выполнения этого выражения на разных компьютерах одинаковое, то получаем, что RISC-компьютер в четыре раза производительней CISC-компьютера. Полный абсурд, ведь время-то выполнения одной и той же программы на разных компьютерах одно и то же.

Так что, старине MIPS пора на пенсию? Рановато, однако. В единицах MIPS удобно мерить пиковую производительность процессора, производительность в идеальных условиях. А почему нет? Ведь оцениваем мы процессоры по тактовой частоте, не задумываясь об архитектурных изысках. Лучше уж в MIPS. Притом для вычисления пиковой производительности не надо даже писать тестовую программу. Самая быстрая инструкция в конвейере выполняется за один такт. Поэтому умножив частоту процессора на количество конвейеров (или параллельно выполняемых операций), получаем пиковую производительность в MIPS. Согласитесь, что при выборе процессоров (в первом приближении) использование MIPS является более грамотным решением, чем сравнение по частоте. Хотя следует признать, что MIPS – это всё-таки вчерашний день.

*MFLOPS* (Million Floating-Point Operations Per Second – миллион операций с плавающей точкой в секунду). Эта единица измерения имеет ряд преимуществ по сравнению с MIPS. Во-первых, во всех современных процессорах операциями с плавающей точкой занимается отдельный блок. Поэтому в любом случае нужны отдельные тесты, ориентированные на проверку этого блока. А производительность в MFLOPS довольно точно даёт представление о возможностях этого блока. Во-вторых, переход от термина «инструкция» к термину «операция» позволяет ослабить влияние архитектуры процессора на результаты тестов. В-третьих, базовых арифметических операций с плавающей точкой немного. Поэтому составить смесь для тестовой программы из четырёх компонентов намного легче, чем, скажем, из 20. Итого получается, что доверие к результатам тестов в MFLOPS гораздо выше, чем в MIPS.

Конечно, как универсальная единица измерения MFLOPS тоже не подходит. Его цифры ничего не скажут нам о том, как процессор обрабаты-

вает ветвления, предсказывает переходы, насколько оптимизирован конвейер и т.д.

В последнее время некоторые производители стали мерить производительность своих процессоров в *MOPS* (Million Operations Per Second – миллион операций в секунду). Это, конечно, лучше, чем в *MIPS*, однако не решает главной проблемы – однозначности оценки. К сожалению, в каких бы единицах мы ни мерили, без указания тестовой программы результаты измерения производительности не означают ничего конкретного. Другой тест – другие цифры.

Попытки стандартизировать бенчмарки предпринимались не раз. В прошлом веке довольно популярным был комплект тестов *Whetstone*, разработанный в Британской национальной физической лаборатории. Результат измерения представляется в *MWIPS* (миллион *Whetstone*-инструкций в секунду) или в *Whetstone MIPS*. Хотя *Whetstone* считается синтетическим тестом, 70% времени выполнения теста приходится на обработку чисел с плавающей точкой. В не менее популярном и таком же древнем тесте *Dhrystone*, наоборот, преобладают операции с символами, строками и логическими переменными. Существуют и другие известные бенчмарки, однако в последнее время на роль промышленного стандарта претендуют контрольно-оценочные программы бесприбыльного консорциума *SPEC*, созданного в 1988 г. и на сегодняшний день объединяющего всех крупнейших производителей компьютерных систем. Цель деятельности *SPEC* – разработка и проведение интенсивных компьютерных тестов для испытания систем, работающих с максимально возможной нагрузкой. Тесты оценки производительности микропроцессоров и вычислительных систем, разработанные *SPEC*, объединены в пакет *CPU2000*. Этот пакет стоит \$500, распространяется в исходниках, для его установки требуется компьютер с операционной системой *UNIX* или *Windows NT*, компиляторы языков *C/C++* и *Fortran 90*, не менее 1 Гб свободного места на жёстком диске и не менее 256 Мб оперативной памяти для запуска тестов. Разработчики тестов *CPU2000* отказались от использования абсолютных единиц типа *MFLOPS* или *MIPS*. Вместо этого ис-

пользуются собственные относительные единицы *SPEC*. Результаты нормализуются по отношению к аналогичным результатам на эталонной машине, в качестве которой выступает рабочая станция *Sun Ultra 5/10*. На данной машине прогон всех тестов *CPU2000* занимает примерно 48 часов. Можно было, конечно, помучить наши процессоры с помощью тестов от *SPEC*, благо, производительностью они уже не уступают многим рабочим станциям прошлого. Однако всё же не для тестирования встраиваемых систем создавали *CPU2000*. Одни названия тестов чего стоят: задача квантовой хромодинамики, моделирование нейронной сети, моделирование землетрясения методом конечных элементов и т.п.

По аналогии со *SPEC* на роль стандартных тестов для встраиваемых систем претендует продукция консорциума *EEMBC* (*Embedded Microprocessor Benchmark Consortium*). Однако получение права на публикацию результатов их тестов – довольно хлопотное дело. Надо стать членом их консорциума, принять на себя определённые обязательства, и т.п. Кроме того, пока ещё трудно сказать, примет ли индустрия в качестве стандарта тесты *EEMBC*. Поэтому обойдёмся более доступными средствами. Ведь перед нами стоит простая задача: оценить производительность *embedded*-процессоров по отношению к процессорам фирмы *Intel*. *Whetstone*, *Dhrystone* и *PCMark2002* позволят подобрать нашим процессорам спринг-партнеров одного роста. Почему именно эти тесты, а не другие? Да потому что это одни из самых известных в мире контрольно-оценочных тестов. Все их достоинства и недостатки описаны не раз и не два. Поэтому все знают, что могут они измерять, а к чему следует относиться с известной долей сомнения. К примеру, размер кода *Whetstone* и *Dhrystone* настолько мал, что программы и данные целиком размещаются в кэш-памяти современных процессоров. Поэтому оценить эффективность механизма динамической подкачки команд в кэш инструкций или протестировать тракт процессор–память с помощью этих программ не удастся.

В качестве теста, имитирующего реальные задачи, мы выбрали *PCMark2002*. В его состав входят следующие тестовые приложения: *Jpeg*

*Decoding*, *Zlib Compression*, *Zlib Decompression*, *Text Search*, *Audio Conversion*, *3D Vector Calculation*. Конечно, их трудно назвать типовыми задачами встраиваемых систем, однако это лучше, чем эмуляция *MS Word* или *Adobe Photoshop*.

## TRANSMETA CRUSOE TM5400

Компьютерная пресса с самого начала внимательно следила за созданием *Crusoe*. Не удивительно, было о чем писать. Во-первых, революционная архитектура процессора. Такого ещё никто для *PC* не делал. Во-вторых, какие имена: *Devid R. Ditzel*, *Linus Torvalds*. Первый – известный микропроцессорный архитектор. Сам термин *RISC* обязан своим рождением в том числе и Дитцелу. Ещё будучи студентом, он вместе с Дэвидом Паттерсоном в одной из статей впервые употребил эту аббревиатуру. Ну а *Линуса Торвальдса*, того самого, представлять, надеюсь, нет необходимости. Кроме того, архитектура будущего процессора чем-то напоминала российский процессор *Эльбрус*. Что, впрочем, объяснимо, и Дитцел, и *Бабаян* в одно и то же время работали в *Sun Microsystems*. Конечно, приятно, что русский след обнаруживается в самых передовых заморских разработках, жаль только, что не в отечественных. Но это всё лирика. Вернемся к *Crusoe*.

Проблема электропотребления, а соответственно, и тепловыделения современных высокопроизводительных процессоров на сегодняшний день стоит очень остро. Безумное повышение частоты процессоров приводит к усложнению его схемотехники, увеличению количества транзисторов в кристалле, а это в свою очередь повышает потребляемую процессором энергию и тепловыделение. Кроме того, себестоимость готового изделия с каждым новым процессором только растёт. Что же делать разработчикам процессоров, ведь увеличивать производительность им всё равно придётся? Как известно, быстроедействие процессора можно повысить двумя способами: поднять тактовую частоту или увеличить количество операций, выполняемых процессором за один такт. Повышение частоты достигается как технологическими приёмами (переходом на новые материалы, уменьшением *LTR*, и т.п.) так и архитектурны-

ми изысками. В настоящее время наиболее популярный метод увеличения степени параллелизма процессора – конвейерная обработка и суперскалярная архитектура. Напомним, конвейерные процессоры разбивают процесс обработки каждой инструкции на несколько этапов (ступеней), что позволяет начать выполнение следующей инструкции, не дожидаясь окончания предыдущей. Ну а суперскалярная архитектура – это когда таких контейнеров несколько. Согласитесь, имея в чипе несколько функциональных блоков (ALU, FPU и т.п.), способных работать почти независимо друг от друга, грех заставлять их простаивать в ожидании работы. Всё замечательно, но выполнять одновременно несколько инструкций возможно, когда результаты одной команды не зависят от предыдущей. Само собой разумеется, что если не полагаться на удачу, то придётся выполнять команды не в порядке их следования (Out-of-Order). Иными словами, процессор должен уметь, заглянув вперед и проанализировав поток команд, выбрать наилучшую очередность выполнения инструкций, а по окончании работы восстановить первоначальный порядок «слов в предложении». К сожалению, для реализации всех этих блоков прогнозирования и планирования вычислений, поиска закономерностей и восстановления последовательностей требуются миллионы транзисторов. (По некоторым оценкам, три четверти всех микро-транзисторов на кристалле.) А много транзисторов – это много электричества, много выделяемого чипом тепла, плюс немалая себестоимость изготовления кристалла. Вот если бы удалось аппаратное планирование возложить на софт, то это значительно упростило бы архитектуру процессора, со всеми вытекающими последствиями. Такие желания может удовлетворить VLIW-процессор, придуманный Тьюрингом ещё в 1996 г. VLIW (Very Long Instruction Word) – очень длинное командное слово. В двух словах, идея в следующем: программное обеспечение (компилятор, транслятор), анализируя исполняемое приложение, выискивает инструкции, которые можно выполнить одновременно. Меняя естественную очередность, инструкции (атомы в терминологии Transmeta) собирают-

ся в слова (молекулы) и отправляются на одновременное исполнение функциональным модулям процессора. Для того чтобы за один такт процессор смог обработать целое слово, инструкции в этом слове должны обрабатываться разными модулями процессора. Поэтому в идеале количество инструкций в слове должно соответствовать количеству функциональных модулей процессора. Чем больше модулей, тем длиннее слово, тем больше инструкций за такт может выполнить процессор. У Crusoe пять исполнительных блоков: блок работы с плавающей запятой (FPU), два арифметико-логических блока (ALU), блок работы с данными (LSU – Load/Store Unit), блок ветвлений (BU). С учётом накладных расходов инженеры Transmeta выбрали для Crusoe TM5400 длину молекулы в 4 атома. Поэтому процессор может выполнить максимум 4 команды за такт.

Первые процессоры с VLIW-ядром появились в 1979 г. Однако Crusoe – это первый VLIW-процессор, умеющий выполнять x86-инструкции. Кроме того, в отличие от классических VLIW-машин, для которых смесь параллельного кода в программах готовили статически (на уровне компилятора), Crusoe делает всё в динамике. Программное ядро Crusoe на лету анализирует исполняемый код, транслирует его в собственный набор инструкций, ищет закономерности, планирует порядок выполнения, прогнозирует ветвления и т.п. Всем этим занимается Code Morphing – программная оболочка между ядром и операционной системой. Один из наших заказчиков, узнав, что Crusoe – это не «чистокровный» x86-процессор, а эмулятор, сразу забеспокоился по поводу совместимости. Беспокойство напрасное. Кроме того, даже Pentium, к примеру, только эмулирует команды x86-процессора, а внутри него давно уже течёт кровь из RISC-подобных инструкций. То же самое касается и многих других x86-процессоров. Отличие Crusoe в том, что блок трансляции x86-команд вынесен наружу, за пределы чипа. Как и многие другие аппаратные функции, трансляцию Crusoe выполняет программно. Кстати, такой подход позволяет выпускать одни и те же процессоры, но с разной системой команд. Кроме того, программный upgrade процессора – это мечта многих про-

изводителей. Знаменитая ошибка Fdiv, обнаруженная у Pentium в 1991 г., заставила Intel потратить 475 млн. долларов на замену чипа. У Pentium II нашли уже более 50 ошибок. Понятно, что если постоянно тратить деньги на замену процессоров, то дешевле закрыть производство. Да, Intel частично решил проблему, придумав технологию reprogrammable microcode. Однако заплатки микрокода не всегда позволяют нейтрализовать ошибки, допущенные на стадии разработки или производства процессора. А Code Morphing – это программа. Поэтому и изменить её на порядок легче.

Ещё одна технология Transmeta, о которой следует упомянуть, – это LongRun. Освобождение ядра от многих компонентов упростило архитектуру Crusoe, уменьшило количество транзисторов в чипе, что, в свою очередь, уменьшило электропотребление и тепловыделение процессора. Однако инженеры Transmeta на этом не остановились. Их фирменная технология энергосбережения LongRun, подстраивающая частоту и напряжения питания процессора в зависимости от его загрузки, позволяет достичь рекордно низких значений электропотребления – от нескольких сотен мВт до 2 Вт.

Тесты (рис. 1) показывают, что производительность Crusoe TM5400 500 МГц на уровне Celeron 400 МГц. Чудес не бывает, программная оболочка вокруг ядра, безусловно, снижает производительность процессора. Однако её достаточно для большинства задач, а по соотношению производительность/электропотребление Crusoe – один из лидеров.

## GEODE GX1

Geode (Жеода) – это кварцевый шарик, образующийся путем заполнения минералами пустот в горных породах, внутри которого, если повезёт, можно найти самоцветы (аметист, горный хрусталь, целестин и т.п.). Не знаю, как насчёт самоцветов, но вот свою «пустоту», свою нишу на рынке процессоров Geode, без сомнения, нашёл. Родоначальник семейства Geode, чип MediaGX, родился в 1997 г. Это был один из первых, если не первый, процессор, выполненный по принципу System-on-Chip (система на одном кристалле). Разместив в одной микросхеме процессорный модуль, видеоконтроллер, аудио, интер-

фейс PCI и контроллер памяти, инженеры Sugh обезопасили систему от потенциальных конфликтов, устранили проблемы конфигурирования для пользователей, повысили надёжность системы. Ну, а самое главное – такая интеграция позволила производителям компьютеров снизить цену готового устройства в целом, поскольку отпала необходимость во многих внешних платах. Первоначально Geode позиционировался как дешёвая альтернатива Intel. Однако процессорный гигант такими темпами наращивал производительность своих чипов, что стало ясно: соперничать с ним в секторе настольных персональных компьютеров – себе дороже. Короче, конкурировать с Pentium не получилось. Зато удалось освоить, а во многом и сформировать нетронутый рынок информационных устройств, т.е. вычислительных систем, не являющихся персональными компьютерами. Web-PDA, интернет-терминалы, «умные» бытовые приборы, мультимедийные приставки к телеприемникам, и т.п. – всем этим приборам требуются дешёвые интегрированные процессоры с низким энергопотреблением. Кроме того, ультранизкая потребляемая и рассеиваемая мощность, позволяющая оказаться от принудительного охлаждения процессора, плюс интегрированная архитектура и малая стоимость Geode заинтересовала производителей встраиваемых систем в промышленности. На сегодняшний день все крупнейшие производители embedded-систем (Advantech, Lippert, Octagon, Fastwel и т.п.) имеют в своём арсенале процессорные модули на базе Geode. В последнее время мы наблюдаем победное наступление на рынок встраиваемых систем ARM-подобных процессоров. Однако они имеют один существенный недостаток – несовместимость с x86. Да, у системы команд x86 много недостатков, сдерживающих увеличение производительности процессоров, однако возможность использования одного и того же базового ПО на любых компьютерах, от КПК до многопроцессорных серверов, – дорогого стоит. Как это ни странно, но самым ярким сторонником x86 является не компания Intel, а AMD. К примеру, интеловский XScale для рынка встраиваемых и мобильных систем – это, как известно, ARM-процессор. А Itani-

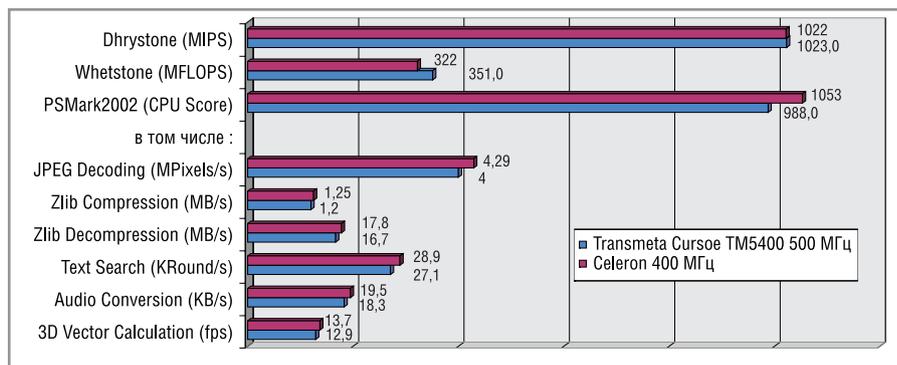


Рис. 1. Сравнение производительности процессоров Crusoe TM5400 500 МГц и Celeron 400 МГц

um для мощных серверов немного ушёл в сторону от x86. Во всяком случае, новый Athlon64 от AMD более совместим с прежним ПО. «x86 повсюду» – такими словами озвучил стратегическую линию AMD её гендиректор Гектор Руиз. А если ещё вспомнить его рассуждения о том, что «из-за огромного числа существующих и разрабатываемых устройств и разнообразия предъявляемых к ним требований компьютерная индустрия нуждается в расширении спектра более специализированных процессоров, отвечающих разным требованиям по стоимости и производительности», – становится понятно, зачем AMD купила у National Semiconductor все права на Geode. AMD обещает в скором времени удивить нас новыми embedded-процессорами, ещё более дешёвыми, ещё более производительными. Будем надеяться, пока же рассмотрим технические характеристики того, что имеем.

Geode GX1 – это 32-битный x86-совместимый процессор, созданный по 0,18-микронной технологии и работающий на частотах 200...333 МГц. Энергопотребление 0,8...5 Вт в зависимости от частоты и нагрузки. Поддержка MMX-инструкций для ускорения мультимедийных приложений. 16 Кб кэш-памяти первого уровня, 6-ступенчатый внутренний контейнер, блок FPU, контроллер памяти, блок управления питанием, PCI-контроллер, контроллер дисплея, 2D-видеоакселератор.

Чипы-компаньоны: CS5530A и CS9211. Первый совмещает аудио-контроллер, контроллер IDE, мост с шиной ISA и портами ввода-вывода и обеспечивает видеоинтерфейс. Второй представляет собой контроллер LCD.

Поддерживаемые ОС: DOS, Windows 2000/98/CE, QNX, Linux.

Думаю, не открою Америки, если скажу, что потребляемая мощность является важнейшей характеристикой для встраиваемых систем. Я имею в виду не только процессор, но и всю систему. Понятно, что мало толку от экономичного процессора, если от энергии, выделяемой остальные чипами, установленными на плате, закипает чайник.

Низкое электропотребление – одно из главных достоинств комплекта Geode GX1. Чтобы не быть голословными, сравним несколько систем (см. рис. 2). В качестве тестовой платформы мы выбрали платы фирмы Advantech в формате Biscuit SBC. Платы этой серии имеют практически одинаковые периферийные интерфейсы, поэтому позволяют сравнивать процессорные системы в равных условиях.

Считается, что рассеиваемая мощность приблизительно составляет 70...80% от потребляемой и что принудительное охлаждение в нормальных условиях обычно требуется при рассеивании более 10...15 Вт. Как мы видим, Geode укладывается в эти энергетические рамки. Однако следует учитывать, что у конкурентов больше частота. И по соотношению производительность/мощность Geode им проигрывает. Продолжая тему производительности, смотрим на рис. 3. Pentium 166 MMX – вот чему приблизительно соответствует производительность Geode GX1 300 МГц.

Конечно, в сравнении с новейшими мобильными процессорами Intel характеристики Geode не впечатляют. Тем не менее, совершенно очевидно, что большинству приложений для встраиваемых систем производительности Geode более чем достаточно. Кто-то из известных программистов сказал: «Можно, разумеется, со-

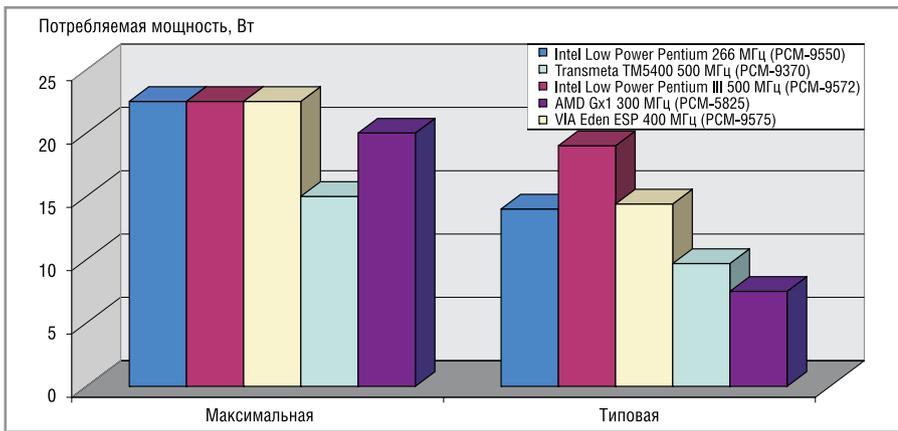


Рис. 2. Мощность потребления процессоров Intel Low Power Pentium 266и МГц, Transmeta TM5400 500 МГц, Intel Low Power Pentium III 500 МГц и AMD GX1 300 МГц и VIA Eden ESP 400 МГц

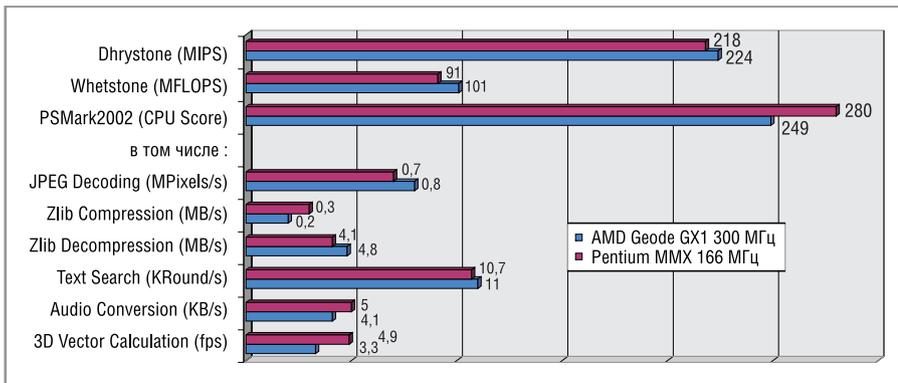


Рис. 3. Сравнение производительности процессоров AMD Geode GX1 300 МГц и Pentium MMX 166 МГц

бирать Феррари для каждого из заказчиков и брать с них цену Феррари, тогда как все, что им нужно, – простой Опель. Однако такой подход характерен для врачей, но не для нас». Я тоже уверен в бесперспективности подобных подходов. Разве ещё не перевелись неискушённые Заказчики на земле русской?

### VIA EDEN ESP 4000

Тайваньская компания VIA, как известно, является выдающимся производителем чипсетов, успешно конкурирующим на этом рынке с Intel. Однако выпускаемая компанией VIA продукция не ограничивается только микросхемами для материнских плат. В списке продаваемых под её маркой продуктов есть и графические решения, и материнские платы, а с недавних пор и процессоры. Первый серийный процессор с логотипом VIA появился в продаже несколько лет назад и назывался VIA Cyrix III. Однако к фирме Cyrix, купленной VIA незадолго до этого события, этот процессор отношения не имеет. Дело в том, что VIA приобрела сразу две фирмы, занимающиеся разработкой процессоров, – Cyrix у

National Semiconductor и Centaur у IDT. Обе компании уже имели почти готовые к производству процессоры. VIA планировала сначала запустить в производство Cyrix. Однако характеристики процессора не удовлетворили руководство компании, поэтому первый серийный процессор имел ядро Samuel, доставшееся VIA в наследство от Centaur. Что касается собственно названия процессора – Cyrix, то VIA просто выбрала из того, что имела, более известную и узнаваемую процессорную марку. Процессоры VIA C3 и Eden ESP 4000 (5000) с ядром Samuel2 – это уже второй опыт тайваньской фирмы на ниве процессорного производства. C3 предназначен для рынка малобюджетных ПК, а Eden ESP – для встраиваемых систем. Поэтому первый выпускается в корпусе PGA под Socket-370, а второй – в низкопрофильном EBGA. Но это снаружи, внутри же всё одинаково. Дело в том, что к embedded-процессорам всегда предъявляются повышенные требования по тепловым и электрическим характеристикам. Поэтому после отбраковки кристаллы, прошедшие тесты на «embedded», становятся Eden, а

остальные – C3. Жёсткий отбор позволяет VIA установить для Eden допустимую температуру ядра в 85°C (против 75°C у C3) и гарантировать работоспособность процессоров Eden при пассивном охлаждении.

Основные характеристики VIA Eden ESP 4000:

- чип, произведённый по технологии 0,15, 0,13 мкм;
- ядро Samuel2 с площадью 52 мм<sup>2</sup>;
- системная шина +GTL с частотой 100 или 133 МГц;
- кэш первого уровня 128 Кб по 64 на адрес и данные;
- кэш второго уровня 64 Кб;
- напряжение питания 1,05 В;
- набор SIMD-инструкций MMX, 3DNow!;
- частота 400 МГц (4 × 100).

Рассмотрим основные идеи, заложенные в архитектуру Samuel2. Во-первых, процессор для embedded-систем должен быть небольшого размера. Это снижает стоимость, потребляемую мощность и увеличивает надёжность. Ядро Eden всего 52 мм<sup>2</sup>, одно из самых малых среди конкурирующих продуктов. Во-вторых, считая, что в типичном приложении из всего набора команд x86-процессора 90% процессорного времени расходуется на исполнение ограниченного количества инструкций, инженеры VIA оптимизировали процессор под доминирующий набор инструкций. В результате некоторые команды выполняются за меньшее число тактов, чем в процессорах Intel. Такое компромиссное решение, с одной стороны, увеличило производительность Eden, с другой стороны, позволило процессору оставаться в энергетических и стоимостных рамках. В-третьих, повышение производительности процессоров путём увеличения количества операций, выполняемых процессором за один такт, всегда умножает сложность процессора и увеличивает размеры кристалла. По мнению VIA, оптимальный способ улучшения производительности процессора – это увеличение тактовой частоты, которую можно поднять и технологическими приёмами. Поэтому в VIA отказались от использования в Eden таких привычных для современных процессоров технологий, как гиперконвейеры, исполнение инструкций не в порядке их следования, спекулятивное исполнение ветвлений и т.п.

В-четвертых, медленная внешняя память во многом снижает производительность процессора. Оттого объём и организация кэш-памяти напрямую влияют на производительность. Инженеры VIA решили увеличить кэш-память первого уровня и TLB (буфер, хранящий соответствие линейных и физических адресов памяти) у Eden до рекордных размеров – 128 Кб. Это больше, чем у любого x86-совместимого процессора. Кроме того, используется «эксклюзивная» система кэш-памяти. То есть данные, хранящиеся в кэше первого уровня, не дублируются в кэше второго уровня. Все эти меры, по мнению VIA, обеспечивают существенный прирост производительности.

Пару слов о недостатках Eden, вернее, о компромиссах, на которые пошли разработчики с целью сохранения баланса между производительностью и стоимостью процессора. «До тех пор, пока процессор Eden ESP будет предназначен главным образом для целочисленных вычислений, производительность FPU не будет для VIA приоритетной» – приблизительно так можно перевести ответ VIA на упреки, касающиеся

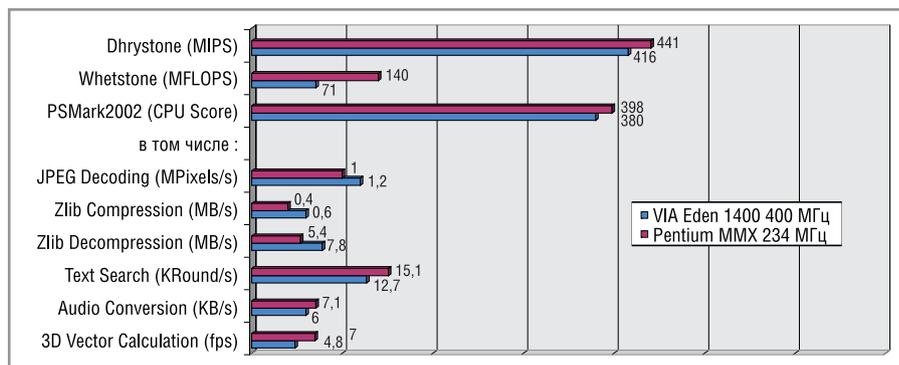


Рис. 4. Сравнение производительности процессоров VIA Eden ESP 400 МГц и Pentium MMX 234 МГц

скорости, а вернее, отсутствия таковой, при выполнении операций с плавающей точкой. После подобных слов не удивительно, что даже частота FP-блока равна половине частоты работы процессора. Такой подход может нравиться или нет, но это официально заявленная позиция VIA. Я не считаю, что медленный FPU-блок сильно навредил популярности Eden, просто надо помнить, что этот процессор создавался не для сложных математических вычислений.

Рисунок 4 даёт представление о производительности Eden ESP 400 МГц. У меня получилось, что Pentium MMX

234 МГц выполняет тесты с такой же скоростью.

Итого. Пытаясь избежать соблазна устроить битву между процессорами, я специально не стал сводить все цифры в одну таблицу. Интеграция периферии, производительность, потребляемая мощность, цена – важнейшие критерии выбора процессора. И у каждой процессорной платформы свои достоинства и недостатки. Идеального же процессора, решающего задачи лучше специализированного DSP, интегрирующего в себе всю периферию, охлаждающего окружающую среду не хуже холодильника и стоящего пару центов, ещё не изготовили. ☺

## Минимальная цена бита вашей информации

intel®



Флэш-память Интел для встраиваемых приложений

### ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Напряжение питания 3 В обеспечивает низкое потребление энергии
- Объём от 32 до 256 Мбит. Технология хранения 2 бит информации в одной ячейке позволяет уменьшить габариты и стоимость микросхемы
- Специализированные режимы ускоренного чтения burst и page mode
- Расширенный температурный диапазон для жёстких условий эксплуатации
- Богатый выбор программного обеспечения
- Различные типы корпусов, включая BGA

### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Промышленная автоматика
- Бытовые компьютеры
- Промышленные компьютеры
- Бортовые системы управления

PROSOFT®

ПРОСОФТ – АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

Телефон: (095) 234-0636 • E-mail: info@prochip.ru • Web: www.prochip.ru

# Современные микросхемы УМЗЧ класса D фирмы MPS

Игорь Безверхний (г. Киев, Украина)

Современные интегральные УМЗЧ класса D совмещают, казалось бы, несовместимое: высокий КПД и низкий коэффициент нелинейных искажений. В настоящей статье описаны основные принципы работы усилителей класса D и приведено описание линейки микросхем УМЗЧ американской фирмы MPS (Monolithic Power Systems).

В последнее десятилетие в схемотехнике усилителей мощности (УМЗЧ) получили развитие два взаимоисключающих направления:

- ✓ улучшение субъективного качества воспроизведения звука, как правило, за счёт уменьшения экономичности (КПД) усилителя;
- ✓ повышение экономичности усилителя и уменьшение его размеров при сохранении высоких качественных показателей.

Первое направление характерно использованием в выходных каскадах УМЗЧ мощных полевых транзисторов и радиоламп (Hi-End), работающих очень часто в режимах класса А.

Второе направление характерно для носимой и автомобильной звуковоспроизводящей аппаратуры. Именно в реализации этого направления широко используются усилители класса D, а в высококачественной звуковоспроизводящей стационарной аппаратуре класс D используется чаще всего в усилителях для сабвуфера.

Всего существует пять основных классов режимов работы активных элементов (транзисторов или ламп). Это режимы работы класса А, В, АВ, С и D. Вспомним их особенности.

## РЕЖИМ РАБОТЫ КЛАССА А

Активный элемент (транзистор или лампа) открыт весь период сигнала. Усилители мощности класса А вносят минимальные искажения в усиливаемый сигнал, но имеют очень низкий КПД. Они используются в одноконтурных и двухтактных УМЗЧ для среднечастотных динамиков и твитеров, где особенно важно, чтобы уровень нелинейных искажений был низким. Усилители класса А – самые дорогие.

## РЕЖИМ РАБОТЫ КЛАССА В

Активный элемент (транзистор или лампа) открыт только один полупериод входного сигнала. Усилители класса В имеют высокий КПД, но и коэффициент нелинейных искажений у них заметно выше. Обычно используются в двухтактных УМЗЧ для среднечастотных динамиков и динамиков mid-bass.

## РЕЖИМ РАБОТЫ КЛАССА АВ

Активный элемент (транзистор или лампа) в этом режиме открыт один полупериод полностью и часть другого полупериода входного сигнала. Режим класса АВ – это нечто среднее между классами А и В. Усилители класса

АВ имеют более высокий КПД, чем усилители класса А, но вносят в сигнал меньшие нелинейные искажения, чем усилители класса В. Это наиболее распространенный класс массовых УМЗЧ.

## РЕЖИМ РАБОТЫ КЛАССА D

В режиме работы класса D происходит преобразование входного сигнала в

импульсы прямоугольной формы одинаковой амплитуды, длительность которых пропорциональна значению сигнала в каждый заданный момент времени (т.н. ШИМ – широтно-импульсная модуляция). Активные элементы выходного каскада при этом работают в ключевом режиме и имеют два состояния: транзистор или заперт, или полностью открыт. Усилители класса D имеют максимальный КПД, т.к. основные потери энергии на выходных мощных ключах происходят только в момент переключения, в открытом состоянии потери энергии минимальны и будут тем меньше, чем меньше сопротивление открытого ключа. Обычные усилители класса D имеют КПД более 90% и достаточно большой коэффициент нелинейных искажений (около 10%), но применение новых технологий (ноу-хау производителей) позволяет снизить коэффициент нелинейных искажений до долей процента. Это заметно расширило область применения класса D в современных УМЗЧ.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ УМЗЧ КЛАССА D

Принципиальная схема простейшего УМЗЧ класса D показана на рис. 1.

Он состоит из широтно-импульсного модулятора (ШИМ) на транзисторе Q1, двухтактного мощного транзисторного ключа Q2, Q3 и фильтра нижних частот (ФНЧ), который отфильтровывает импульсные высокочастотные составляющие тока через громкоговоритель. Делитель на резисторах R1 и R2 задаёт напряжение смещения Q1 и симметрию всей схемы. R3 – резистор нагрузки транзистора Q1. R4, C4 – цепь эмиттерной термостабилизации этого транзистора. C1 – конденсатор фильтра питающего напряжения. C5, R5, L1, C6 – фильтр нижних частот (ФНЧ). C7 – разделительный конденсатор. В состав усилителя класса D входит также генератор треугольного или пилообразного напряжения. Частота работы этого генератора

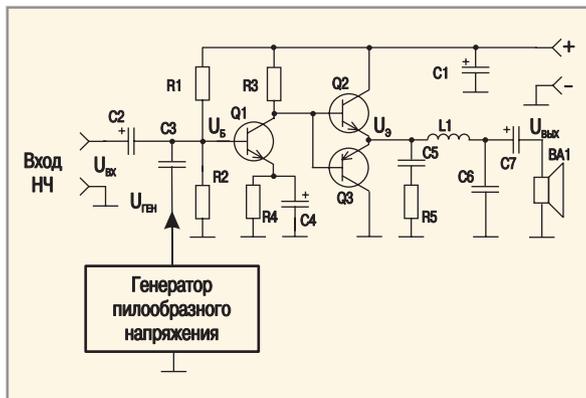


Рис. 1. Принципиальная схема простейшего УМЗЧ класса D

лежит, как правило, в пределах 200...600 кГц. Размах «пилы» от генератора и коэффициент усиления каскада на Q1 выбраны так, чтобы выходные транзисторные ключи Q2 и Q3 открывались попеременно до насыщения при переходе напряжения «пилы» через ноль. Эпоны напряжений, поясняющие работу этой схемы, показаны на рис. 2. До момента времени A (см. рис. 2) звуковой сигнал на входе отсутствует. «Пила» абсолютно симметрична, и на эмиттерах транзисторов Q2 и Q3 образуются симметричные прямоугольные импульсы – меандр. При подаче на вход усилителя сигнала НЧ «пила» будет смещаться вверх или вниз. Изменяется моменты отпирания транзисторов и, как следствие, длительность выходных импульсов и пауза между ними (см. рис. 2). Эти параметры будут изменяться по закону входного низкочастотного (звукового) сигнала. Полученный импульсный сигнал с переменной скважностью называют широтно-импульсным, или ШИМ-сигналом, а процесс его получения – широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). ШИМ-сигнал содержит НЧ-составляющую, по форме повторяющую модулирующий сигнал. Если ШИМ-сигнал с выхода транзисторных ключей пропустить через ФНЧ, то он пропустит эту составляющую на громкоговоритель и подавит ВЧ-составляющие ШИМ-сигнала. За счёт неполного подавления ВЧ-составляющей переменное напряжение на громкоговорителе будет несколько изрезанным, что можно увидеть на увеличенном фрагменте к нижнему графику рис. 2. Изрезанность уменьшается с увеличением частоты генератора ШИМ, улучшением качества ФНЧ и применением некоторых ноу-хау, которые тщательно оберегают фирмы – производители микросхем усилителей класса D.

Усилители класса D на биполярных транзисторах ушли в прошлое. Основой современного УМЗЧ класса D являются мощные ключи на МДП-транзисторах, отличающиеся высоким быстродействием и низким сопротивлением канала в открытом состоянии. При использовании таких транзисторов в ключевом режиме достигается высокий КПД. Две практические схемы УМЗЧ класса D на МДП-транзисторах и операционном усилителе приведены в статье [1].

Настоящий бум в использовании режима работы класса D в УМЗЧ начался с появления таких специализированных микросхем, как ZXCD1000 фирмы Zetex [2], и ряда других. Эти микросхемы называют драйверами усилителей класса D. Они содержат ШИМ с генератором «пилы» частотой  $\geq 200$  кГц и обеспечивают управление внешними ключами на МДП-транзисторах. Многие из этих драйверов могут управлять четырьмя внешними выходными ключами на МДП-транзисторах, включённых мостом.

Следующим этапом в развитии УМЗЧ класса D стало создание микросхем, в которые интегрирован не только драйвер, но и выходные ключи на МДП-транзисторах. Именно к таким микросхемам относятся MP7720, MP7731 и MP7781 фирмы MPS (Monolithic Power Systems). Все они монофонические. О номинальной выходной мощности говорит предпоследняя цифра в наименовании: MP7720 – 20 Вт, MP7731 – 30 Вт, MP7781 – 80 Вт. Пиковая выходная мощность этих микросхем вдвое больше. Рассмотрим особенности и схемы включения каждой из них.

### МИКРОСХЕМА УМЗЧ MP7720

Микросхема MP7720 выпускается в корпусах SOIC8 (для поверхностного монтажа) и PDIP8, которые имеют по 8 выводов и одинаковую цоколёвку, или, как сейчас принято говорить, распиновку. УМЗЧ на этой микросхеме имеет номинальную мощность 20 Вт при сопротивлении нагрузки 4 Ом и напряжении питания 24 В. Диапазон воспроизводимых частот – 20 Гц...20 кГц. Он имеет КПД 90% при нелинейных искажениях не более 0,1% для всего диапазона частот и выходной

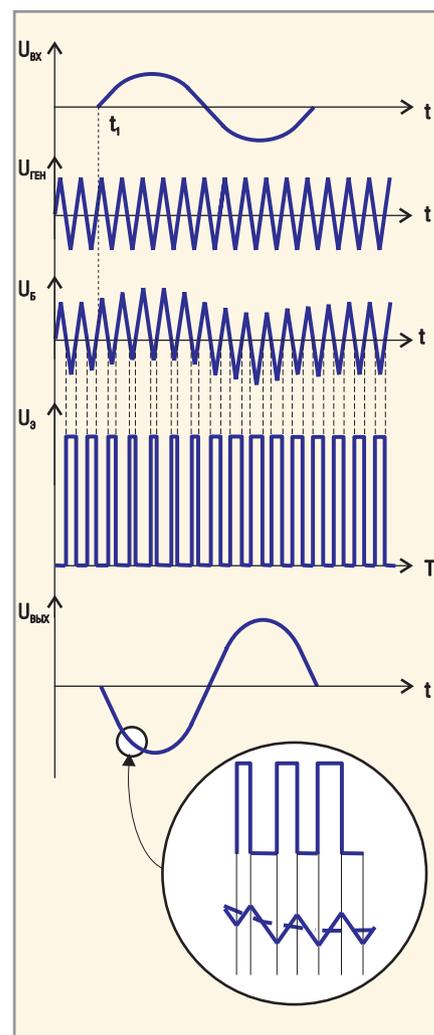


Рис. 2. Эпоны напряжений простейшего УМЗЧ класса D

мощности 1 Вт (0,06...0,07% для частоты 1 кГц). Напряжение питания 7,5...24 В. В микросхему встроены два выходных ключа на МДП-транзисторах, которые включены последовательно по питанию (полумост). Типовая принципиальная схема УМЗЧ класса D на микросхеме MP7720 изображена на рис. 3, а назначение выводов этой микросхемы приведено в таблице 1.

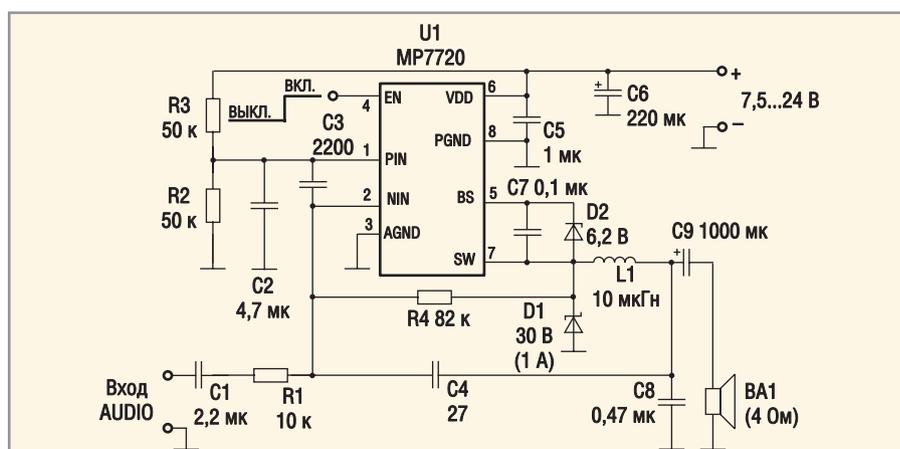
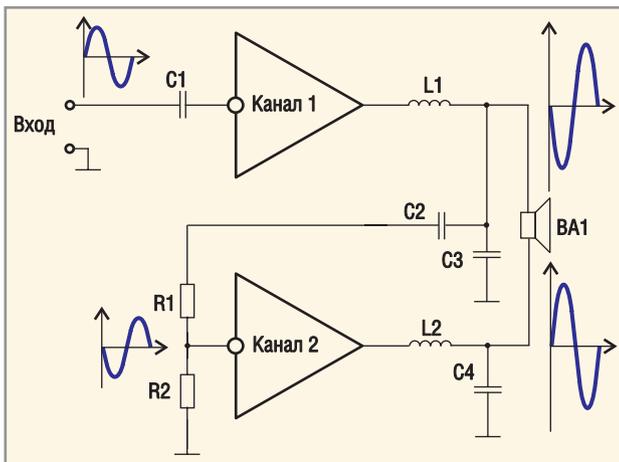


Рис. 3. Принципиальная схема УМЗЧ класса D на микросхеме MP7720



**Рис. 4. Упрощённая схема УМЗЧ с мостовым выходом (метод Master – Slave)**

C1, C2 – разделительные конденсаторы,  
R1, R2 – делитель напряжения сигналов,  
L1, C3 и L2, C4 – ФНЧ

Схема включения этой микросхемы очень напоминает ОУ или УМЗЧ на микросхемах, которые работают в привычных режимах классов А, В или АВ. Микросхема U1 MP7720 имеет дифференциальный вход (выводы 1 и 2), его положительный (неинвертирующий) вывод в данной схеме используется как вход напряжения смещения, который задаёт режим микросхемы, а главное – симметрию схемы. Напряжение смещения на неинвертирующем входе (вывод 1) должно быть равно половине напряжения питания, оно формируется делителем R3, R2. Конденсатор C2 блокирует этот вывод по переменному напряжению. Следует заметить, что асимметрия схемы может привести к увеличению нелинейных искажений и даже к перегреву одного из выходных ключей и выходу микросхемы из строя. Входной сигнал поступает на инвертирующий вход микросхемы (вывод 2) через разделительный конденсатор C1 и ограничивающий резистор R1. В позиции

C1 фирма – разработчик микросхемы рекомендует использовать керамический конденсатор типов NPO, X7R, X5R или эквивалентных им типов. Коэффициент усиления по напряжению микросхемы определяется соотношением номиналов резисторов цепи ООС R1 и R4 и может быть рассчитан по формуле:

$$KU = R4/R1.$$

Для повышения размаха выходных импульсов микросхемы используется известная по обычным двухтактным бестрансформаторным усилителям схема повышения КПД с конденсатором вольтодобавки C7, который включён между выходом (выводом 7) и входом цепи вольтодобавки (вывод 5). Ёмкость конденсатора C7 выбирается в пределах 0,1...1 мкФ. Для защиты внутренних цепей микросхемы от перегрузки параллельно C7 подключён стабилитрон D2 с напряжением стабилизации 6,2 В. Для выделения усиленного сигнала и подавления высокочастотных импульсных составляющих в нагрузку к выходу (вывод 7) подключён ФНЧ, состоящий из дросселя L1 и конденсатора C8. Конденсатор C9 – разделительный. Диод Шоттки D1 гасит индукционные токи и выбросы ЭДС, возникающие в L1 в моменты переключения выходных ключей, когда оба ключа заперты. Частота ШИМ-преобразования задаётся цепью обратной связи R4, C3, и при указанных на схеме номиналах она составляет 600 кГц. При большей частоте увели-

чиваются потери мощности, а при меньшей – нелинейные искажения. C4 – конденсатор ООС по высокой частоте. Конденсаторы C6, C5 – развязывающие фильтра питания. Для устранения прохождения импульсной помехи по цепям питания конденсатор C5 должен быть расположен между выводами 6 и 8 микросхемы, причём как можно ближе к этим выводам. Упрощённо работу этого УМЗЧ можно объяснить следующим образом. Входной сигнал через C1, R1 поступает на инвертирующий вход микросхемы (вывод 2). Это приводит к изменению длительности и скважности импульсов частотой 600 кГц на выходе микросхемы (вывод 7) по закону изменения моментального значения входного сигнала и к появлению в выходном сигнале усиленной НЧ-составляющей, повторяющей по форме входной сигнал, которая через ФНЧ L1, C8 и разделительный конденсатор C9 поступает на громкоговоритель. Добавить к этому можно только то, что входной и выходной сигналы противофазны.

### МИКРОСХЕМА УМЗЧ MP7731

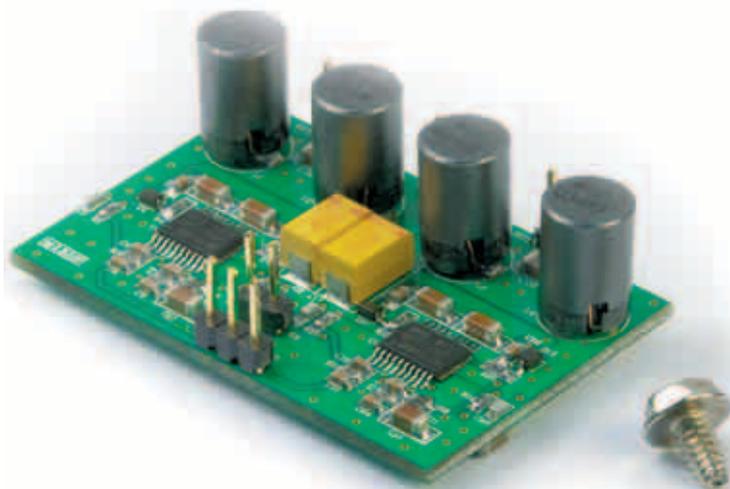
Микросхема MP7731 выпускается в корпусе TSSOP20F для поверхностного монтажа, который имеет 20 выводов и металлическую контактную площадку сверху для теплового контакта с радиатором. Номинальная мощность УМЗЧ на микросхеме MP7731 составляет 30 Вт при сопротивлении нагрузки 4 Ом и напряжении питания 16 В. Диапазон воспроизводимых частот 20 Гц...20 кГц, КПД 90% при выходной мощности 5 Вт. Нелинейные искажения не более 0,1% для всего диапазона частот при выходной мощности 1 Вт. Напряжение питания 7,5...24 В. В микросхему встроены четыре выходных ключа на МДП-транзисторах, которые включены мостом. Особенностью монофонических мостовых УМЗЧ является то, что они имеют два, как правило, равноценных усилительных канала с выходными ключами, которые включены полумостом. То есть микросхема MP7731 содержит два канала, близких по структуре к микросхеме MP7720. Соль в том, что эти каналы работают в противофазе, а нагрузка (громкоговоритель) подключена без разделительных конденсаторов между выходами этих каналов, т.к. посто-

**Таблица 1. Назначение выводов микросхемы MP7720**

Номер вывода	Обозначение	Назначение
1	PIN	Неинвертирующий вход. Может использоваться как положительный вывод дифференциального входа
2	NIN	Инвертирующий вход. Может использоваться как отрицательный вывод дифференциального входа
3	AGND	Корпус аналоговой части
4	EN	Вход разрешения. Высокий уровень – MC включена, низкий уровень – выключена (дежурный режим)
5	BS	Вход цепи вольтодобавки
6	VDD	Вход напряжения питания 7,5...24 В
7	SW	Выход ключевых МДП-транзисторов
8	PGND	Корпус цепей питания

# Готовые решения для качественного звука

**MPS**  
Monolithic Power Systems



Стереоусилитель класса D мощностью 2×30Вт на основе двух микросхем MP7731

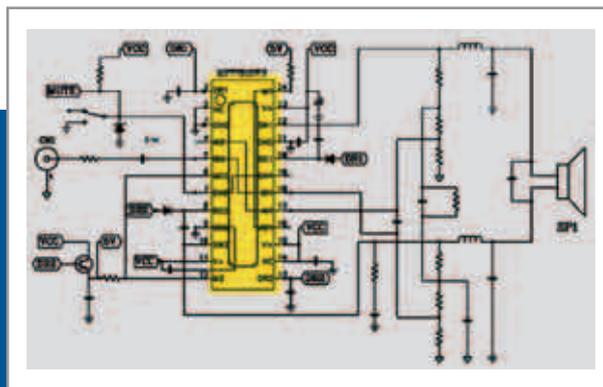
## ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Аудиоусилители от MPS с выходной мощностью до 80 Вт в корпусе SOIC24 не требуют внешнего теплоотвода
- Глубокая обратная связь, а также интегрированные мощные полевые транзисторы позволяют достичь качества звука на уровне усилителей класса АВ
- Стабильная выходная мощность в широком диапазоне питающих напряжений
- Однополярное питание
- Минимальная внешняя обвязка
- Коэффициент нелинейных искажений менее 0,1%
- Расширенный диапазон температур  $-40...+85^{\circ}\text{C}$

## АУДИОУСИЛИТЕЛИ КЛАССА D ОТ MONOLITHIC POWER SYSTEMS

Наименование	Диапазон напряжений питания, В	Пиковая мощность, Вт	КПД, %	Козф-т нелинейных искажений, %, при 1 Вт	Глубина подавления пульсаций источника питания, дБ	Корпус	Особенности
MP7720	7,5...24	20	90	0,04	60	SOIC8 PDIP8	Полумостовая схема подключения
MP7731	7,5...18	30	90	0,1	80	TSSOP20	Мостовая схема подключения
MP7781	7,5...24	80	85	0,1	60	SOIC24	Мостовая схема подключения

Схема аудиоусилителя класса D мощностью 80 Вт на основе MP7781



## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Любые аудиосистемы потребительской электроники, начиная от ноутбуков и кончая системами домашних кинотеатров
- Расширенный температурный диапазон позволяет использовать эти микросхемы в автомобильных аудиосистемах

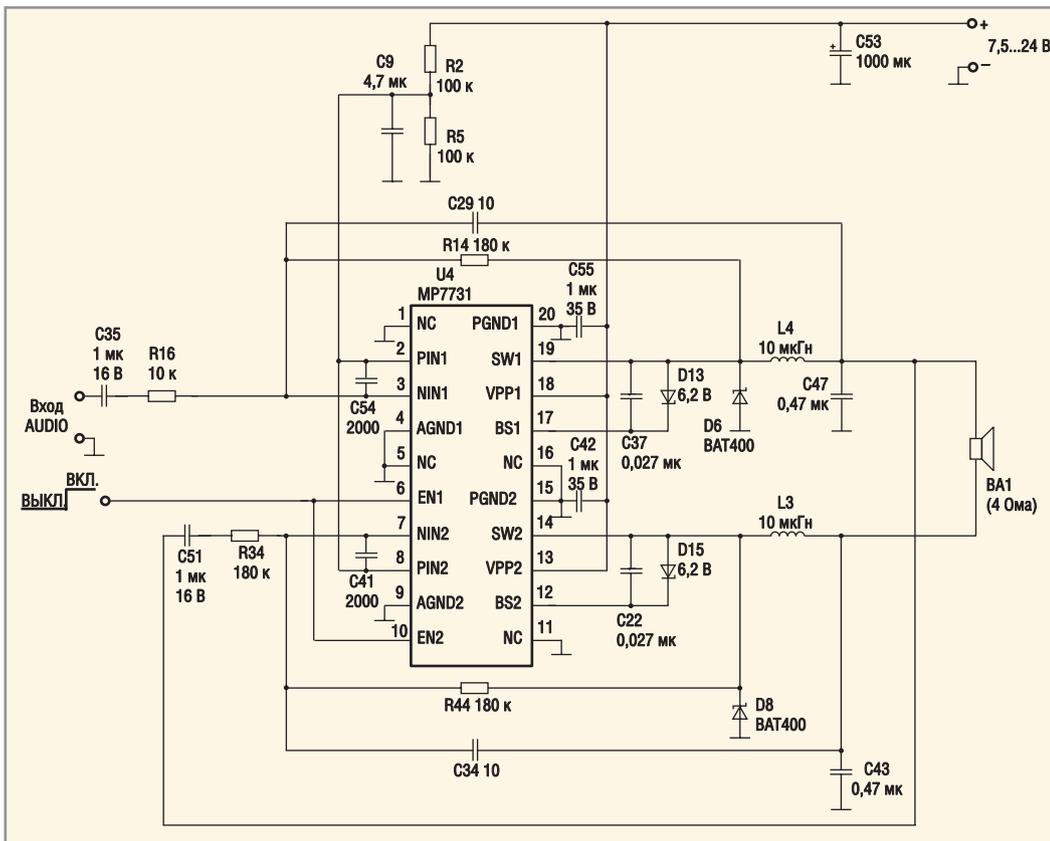


Рис. 5. Принципиальная схема УМЗЧ класса D на микросхеме MP7731

янное напряжение на каждом из выводов выхода равно половине напряжения питания. Для противофазного управления обычно используется включение каналов методом «ведущий – ведомый» (Master – Slave), т.е. оба усилителя включены по входному сигналу последовательно (см. рис. 4). Для такого

включения оба канала должны быть инвертирующими усилителями. Сигнал на второй канал поступает с выхода первого через делитель R1, R2 (см. рис. 4) или ограничивающий резистор.

Типовая принципиальная схема УМЗЧ класса D на микросхеме

Таблица 2. Назначение выводов микросхемы MP7731

Номер вывода	Обозначение	Назначение
1	NC	Не используется
2	PIN1	Неинвертирующий вход канала 1. Используется как вход напряжения смещения (опорного напряжения)
3	NIN1	Инвертирующий вход канала 1
4	AGND1	Корпус аналоговой части 1
5	NC	Не используется
6	EN1	Вход разрешения канала 1. Высокий уровень – MC включена. Низкий уровень – выключена
7	NIN2	Инвертирующий вход канала 2
8	PIN2	Неинвертирующий вход канала 2. Используется как вход напряжения смещения (опорного напряжения)
9	AGND2	Корпус аналоговой части 2
10	EN2	Вход разрешения канала 2. Высокий уровень – MC включена. Низкий уровень – выключена
11	NC	Не используется
12	BS2	Вход цепи вольтодобавки канала 2
13	VPP2	Вход напряжения питания канала 2 (7,5...24 В)
14	SW2	Выход канала 2
15	PGND2	Корпус цепей питания 2
16	NC	Не используется
17	BS1	Вход цепи вольтодобавки канала 1
18	VPP1	Вход напряжения питания канала 1 (7,5...24 В)
19	SW1	Выход канала 1
20	PGND1	Корпус цепей питания 1

MP7731 изображена на рис. 5, а назначение выводов этой микросхемы приведено в таблице 2.

Разберёмся в назначении деталей УМЗЧ на микросхеме MP7731 по схеме (рис. 5). Напряжение смещения на неинвертирующих входах обоих каналов (выводы 2 и 8), равное половине напряжения питания, формируется делителем R2, R5. Конденсатор C9 шунтирует эти выводы по переменному напряжению, а конденсаторы C54 и C41 задают частоты ШИМ-преобразования 1-го и 2-го каналов соответственно. Эти конденсаторы должны быть расположены как можно ближе к выводам, возле которых они нарисованы на схеме. C53 – конденсатор фильтра питания, а C55 и C42 – развязывающие конден-

саторы, которые также надо располагать как можно ближе к выводам, возле которых они нарисованы. Входной сигнал поступает на инвертирующий вход канала 1 (вывод 3) через разделительный конденсатор C35 и ограничивающий резистор R16. Коэффициент усиления по напряжению канала 1 микросхемы определяется соотношением сопротивлений резисторов цепи ООС R14 и R16, а канала 2 – соотношением R44 и R34. ООС по ВЧ в канале 1 осуществляется через конденсатор C29, а в канале 2 – через C34. Конденсатор C37 – это конденсатор вольтодобавки канала 1, а C22 – конденсатор вольтодобавки канала 2. Они повышают КПД усилителя. Параллельно этим конденсаторам подключены стабилитроны D13 и D15 с напряжением стабилизации 6,2 В. Усиленный выходной сигнал звука выделяется в ФНЧ на выходах каналов 1 (L4, C47) и 2 (L3, C43) и поступает на громкоговоритель. ФНЧ подавляют высокочастотные импульсные составляющие ШИМ-сигнала на выходах микросхемы и не пропускают их в нагрузку. Диоды Шоттки D6, D8 гасят индукционные токи и выбросы ЭДС, возникающие в катушках L4 и L3 в моменты переключения выходных ключей, когда все

они запираются. Эти катушки должны быть рассчитаны на номинальный ток 2,6 А. Каждый из каналов имеет свой вход разрешения EN1 (вывод 6) и EN2 (вывод 10). При низком уровне напряжения на этих выводах микросхема будет находиться в дежурном режиме, а при высоком – в рабочем.

### МИКРОСХЕМА УМЗЧ MP7781

Микросхема MP7781 выпускается в корпусе SOIC24 для поверхностного монтажа, который имеет 24 вывода и металлическую площадку сверху для теплового контакта с радиатором. Номинальная мощность монофонического УМЗЧ на микросхеме MP7781 80 Вт при сопротивлении нагрузки 4 Ом и напряжении питания 24 В. Диапазон воспроизводимых частот 20 Гц...20 кГц, КПД 95% при выходной мощности 80 Вт. Нелинейные искажения не более 0,1% для всего диапазона частот при выходной мощности 1 Вт. Напряжение питания 7,5...24 В. В микросхему встроены четыре выходных ключа на МДП-транзисторах, которые включены мостом. Микросхема MP7781 имеет два равноценных усилительных канала с дифференциальными входами и выходными МДП-ключами, которые включены полумостом. Микросхема содержит два канала усиления, каждый из которых заканчивается полумостом на МДП-транзисторах. Все это напоминает MP7731, но в отличие от этой микросхемы, в типовом включении MP7781 используется схема, которую можно назвать параллельно-последовательным включением каналов усиления (см. рис. 6). В этой схеме входной сигнал поступает сразу на входы обоих каналов усиления. Причём в одном канале он поступает на неинвертирующий вход, а в другом – на инвертирующий. Поэтому к верхнему и нижнему выводам громкоговорителя прикладываются одинаковые по амплитуде, но противофазные напряжения сигналов, что видно из графиков, показанных на схеме (рис. 6). Соотношения сопротивлений ограничивающего резистора R1 и резисторов делителей цепей ООС R2, R3, R4, R5 определяют коэффициент усиления схемы. Через делители R2, R3 и R4, R5 задаются также напряжения смещения на входах и осуществляются отрицательные обратные связи

(ООС) по постоянному напряжению, которые стабилизируют режим каналов усиления, т.е. эти делители задают постоянные напряжения на выходах каналов, равные половине напряжения питания, и за счёт ООС поддерживают их неизменными.

Микросхема MP7781 имеет более сложную внутреннюю организацию, чем рассмотренные выше микросхемы. Это косвенно подтверждается количеством и назначением выводов микросхемы, что отражено в таблице 3.

Типовая принципиальная схема УМЗЧ на микросхеме MP7781 показана на рис. 7. Входной сигнал подаётся на выводы 5 и 18 микросхемы через ограничивающий резистор R20 и разделительный конденсатор C25. Резисторы R3, R5, R7, R17, R19, R21, R12, R8 и конденсаторы C6, C24, C9, C15 входят в цепи ООС по постоянному и переменному напряжению. Эти цепи задают коэффициент уси-

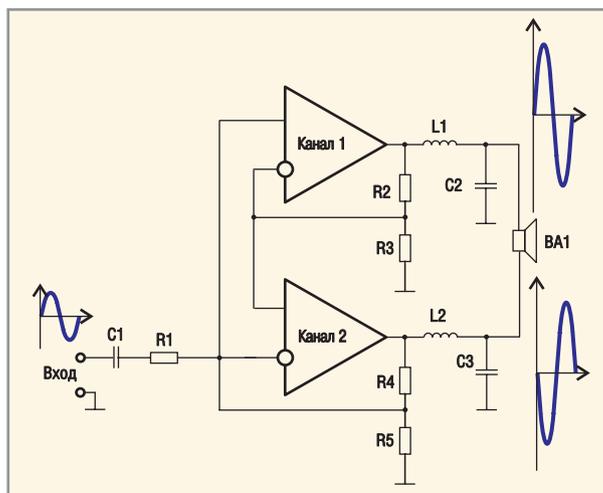


Рис. 6. Упрощенная схема УМЗЧ с мостовым выходом (с параллельно-последовательным управлением)

- C1 – разделительный конденсатор,
- R1 – ограничивающий резистор,
- R2, R3 и R4, R5 – делители цепей ООС по постоянному и переменному напряжению,
- L1, C2 и L2, C3 – ФНЧ

ления микросхемы и постоянные напряжения, равные половине напряжения питания, в средних точках, т.е. на выходах каналов мостового УМЗЧ (выводы 10 и 22 микросхемы). Конденсатор C10 в канале 1 и C18a в канале 2 – конденсаторы вольтодобавки, которые необходимы для повышения КПД усилителя.

Таблица 3. Назначение выводов микросхемы MP7781

Номер вывода	Обозначение	Назначение
1	DR1	Выход управления стабилизатором напряжения питания низковольтной части канала 1
2	NC	Не используется (рекомендуется подключать к выводу 1 или 3)
3	GND	Корпус внутреннего модулятора
4	AI2	Неинвертирующий вход канала 2
5	BI2	Инвертирующий вход канала 2 (вход AUDIO и ООС)
6	MO2	Выход внутреннего ШИМ-канала 2 (с открытым стоком)
7	SHDN2	Вход разрешения канала 2. Активный уровень – низкий
8	BS2	Вход цепи вольтодобавки канала 2
9	GND	Корпус цепей питания канала 2
10	SW2	Выход канала 2
11	V+	Вход напряжения питания ШИМ (7,5...24 В)
12	M2	Вход сигнала ШИМ на предоконечный каскад канала 2
13	DR2	Выход управления стабилизатором напряжения питания низковольтной части канала 2
14	NC	Не используется
15	V+	Вход напряжения питания канала 2 (7,5...24 В)
16	MO1	Выход внутреннего ШИМ-канала 1 (с открытым стоком)
17	AI1	Инвертирующий вход канала 1 (вход ООС)
18	BI1	Неинвертирующий вход канала 1 (вход AUDIO)
19	SHDN1	Вход разрешения канала 1. Активный уровень - низкий
20	BS1	Вход цепи вольтодобавки канала 1
21	GND	Корпус цепей питания
22	SW1	Выход канала 1
23	V+	Вход напряжения питания канала 1 (7,5...24 В)
24	M1	Вход сигнала ШИМ на предоконечный каскад канала 1

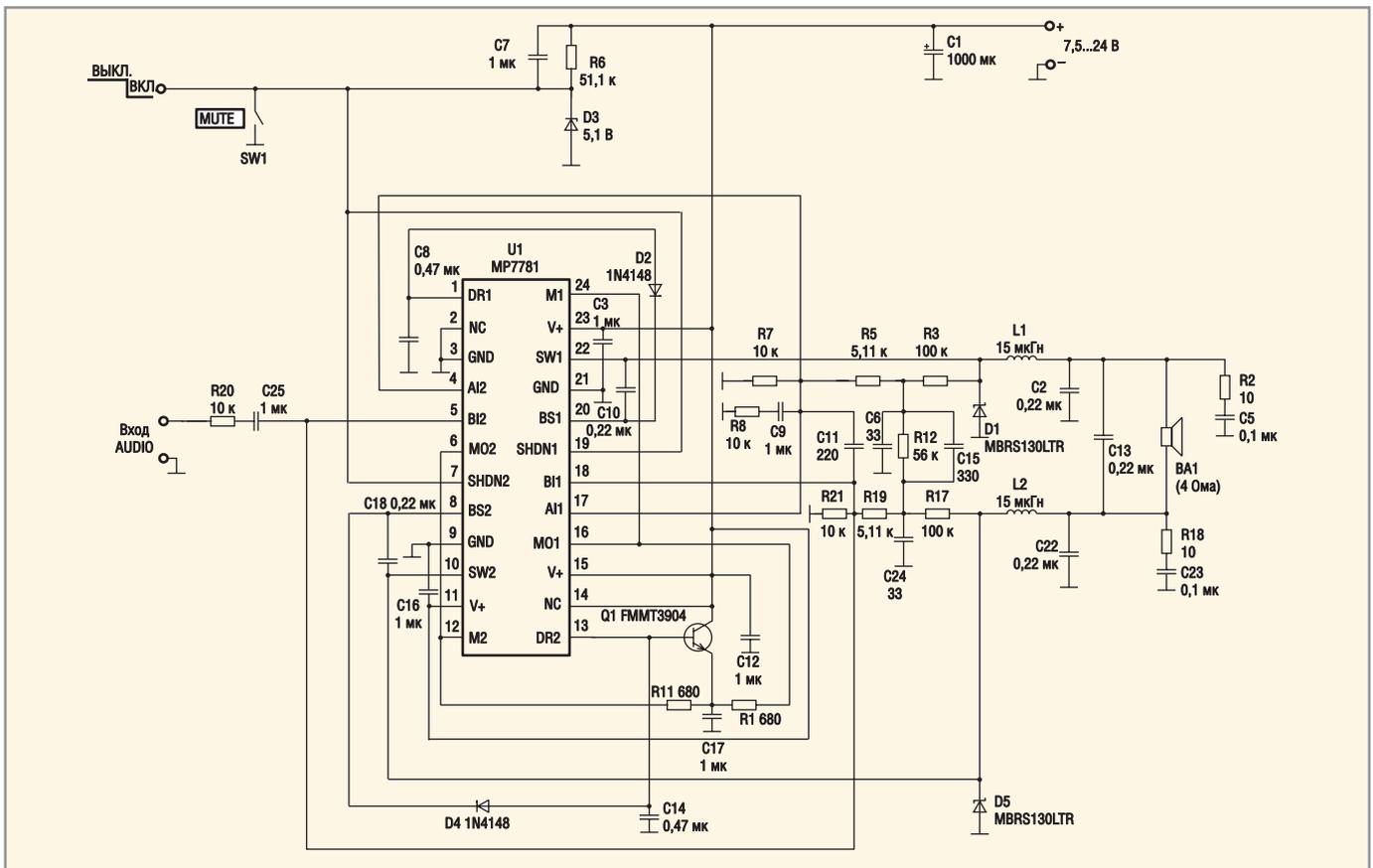


Рис. 7. Принципиальная схема УМЗЧ класса D на микросхеме MP7781

L1, C2, L2, C2, C13, R2, C5, R18, C23 – это детали ФНЧ, которые пропускают на громкоговоритель сигнал звука и подавляют импульсные ВЧ-составляющие сигнала ШИМ. Катушки ФНЧ L1 и L2 должны быть рассчитаны на номинальный ток 5 А. Оптимальная частота ШИМ-преобразования для микросхемы MP7781 составляет 400 кГц. Она определяется ёмкостью конденсатора C11, который включён между выводами дифференциальных входов этой микросхемы (между соединёнными по два выводами 5, 18 и 4, 17). Гашение выбросов ЭДС и индукционных токов, возникающих в

катушках ФНЧ L1 и L2 в моменты переключения выходных ключей, когда все они заперты, осуществляется диодами Шоттки D1 и D5.

Каждый из каналов имеет вход разрешения (активный уровень низкий). Вывод 19 (SHDN1) – это вход разрешения канала 1, а вывод 7 (SHDN2) – вход разрешения канала 2. Эти выводы соединены вместе. Высокий уровень (сигнал запрета) формируется с помощью параметрического стабилизатора R6, D3. При этом уровень усилитель отключён и находится в режиме MUTE, который характерен малым током потребления ( $\leq 10$  мА). Включе-

ние усилителя в рабочий режим осуществляется замыканием выводов разрешения микросхемы на корпус, например, выключателем SW1.

Чтобы получить столь малый ток потребления в режиме MUTE, в микросхему встроены стабилизаторы питания низковольтной части и схема их коммутации. Сигналы управления этой схемы выводятся из микросхемы через выводы 1 (DR1) и 13 (DR2), а затем через коммутирующие диоды D2 и D4 поступают соответственно на выводы 20 (BS1) и 8 (BS2). Кроме того, в рабочем режиме высокий уровень управляющего сиг-

Таблица 4. Особенности микросхем УМЗЧ класса D фирмы MPS

Особенности	Микросхемы		
	MP7720	MP7731	MP7781
Номинальная мощность при $U_{пит} = 24$ В и нагрузке 4 Ом, Вт	20	30 (при $U_{пит} = 16$ В)	80
Коэффициент нелинейных искажений (THD+N) на частоте 1 кГц при выходной мощности 1 Вт, %	0,1	0,1	0,2
КПД, %	90 (при 20 Вт)	90 (при 5 Вт)	95 (при 80 Вт)
Частота преобразования ШИМ, кГц	600	600	400
Напряжение питания, В	7,5...24	7,5...24	7,5...24
Эффективное напряжение входного сигнала, В	1	1	1
Выход	Полумост	Мост	Мост
Сопротивление канала выходных МДП-ключей в состоянии насыщения, Ом	0,180	0,180	0,105
Динамический диапазон, дБ	93	80	90
Корпус	SOIC8 или PDIP8	TSSOP20F	SOIC24

нала с вывода 13 (DR2) открывает ключ на биполярном транзисторе Q1. Через этот транзистор напряжение питания поступает в точку соединения резисторов R1 и R11. У микросхемы MP7781 есть ещё четыре интересных вывода. Это выводы 16 (МО1), 24 (М1), 6 (МО2) и 12 (М2). МО1 и МО2 – это выходы широтно-импульсных модуляторов соответствующих каналов, а М1 и М2 – это входы выходных ключей микросхемы. Выводы МО и М с одинаковыми номерами соединены между собой. Кроме того, выходы МО1 и МО2 имеют открытый сток. Подтягивающие резисторы (резисторы внешней нагрузки), подключённые между этими выводами и напряжением питания на эмиттере транзистора Q1, – это известные уже резисторы R1 и R11. С1 – конденсатор фильтра питания, а конденсаторы С3, С12, С16, С8, С10, С14 и С18 – развязывающие. Для улучшения развязки и уменьшения наводок их рекомендуется устанавливать как можно ближе к соответствующим выводам микросхемы. Для устранения характерного для УМЗЧ щелчка при включении в схему установлены конденсаторы С7 и С9.

Для обеспечения стабильности работы и повторяемости схемы резисторы R3, R5, R7, R17, R19, R21 и R12 должны иметь допуск 1%. Такой же допуск должен иметь и резистор R6.

Следует заметить, что все три микросхемы, представленные в этой статье, имеют встроенную температурную защиту и защиту от коротких замыканий по выходу. Основные особенности и параметры этих микросхем сведены в таблицу 4.

Коэффициент нелинейных искажений, указанный в таблице, дости-

жим и гарантируется только на частоте 1 кГц при выходной мощности 1 Вт. С ростом частоты и мощности он повышается. Зависимость коэффициента нелинейных искажений микросхемы MP7720 от мощности (при частоте сигнала 1 кГц, напряжении питания 24 В и сопротивлении нагрузки 4 Ом) изображена на рис. 8а, а от частоты сигнала (при напряжении питания 24 В, сопротивлении нагрузки 4 Ом и мощности 19,6 Вт) – на рис. 8б.

В заключение хочу заметить, что существует ещё несколько разновидностей усилителей с ШИМ. Во-первых, это усилитель «класса Т», широтно-импульсный модулятор которого меняет не только скважность, но и частоту выходного ШИМ-сигнала. Во-вторых, это так называемый усилитель «класса N», информация о котором можно найти в статье [3]. Это также усилитель, работающий в ключевом режиме, но совмещённый с сетевым блоком питания.

Дополнительную информацию о микросхемах производства Monoli-

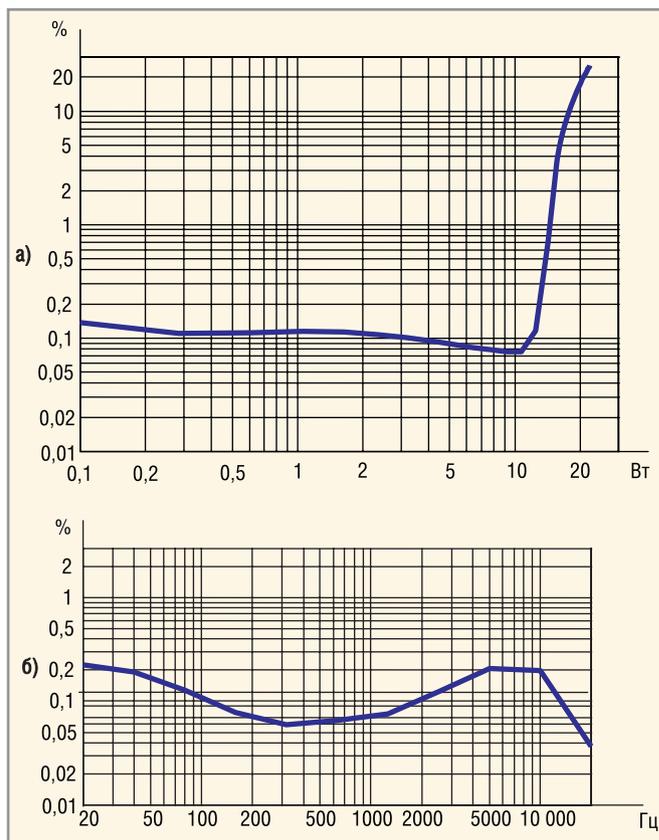


Рис. 8. Зависимость коэффициента нелинейных искажений микросхемы MP7720:

- а) от мощности при частоте сигнала 1 кГц, напряжении питания 24 В и сопротивлении нагрузки 4 Ом;  
б) от частоты при напряжении питания 24 В, сопротивлении нагрузки 4 Ом и мощности 19,6 Вт

thic Power Systems можно найти на сайте фирмы [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев Е. Усилитель класса D для сабвуфера. Радио. 2003. № 5.
2. Дайджест «Новая техника и технология». Радиолюбби. 2001. № 2. С. 9.
3. Колганов А. Автомобильный УМЗЧ с блоком питания. Радио. 2002. № 7. С. 20...22.
4. www.monolithicpower.com.



## Новости российских дистрибьюторов

### Усилитель класса D без выходного фильтра

Усилитель класса D с фиксированным коэффициентом усиления LM4667 фирмы National Semiconductor выполнен в корпусе micro SMD с 9 выводами. Обходясь минимумом дополнительных деталей, этот усилитель благодаря уникальному дельта-сигма-модулятору не требует даже выходного фильтра, характерного для усилителей этого класса. Усилитель питается от однополярного источника напряжением 2,7...5,5 В и

отдает в 8-омную нагрузку мощность 450 мВт при коэффициенте искажений менее 1%.

### Скоростные усилители для видео- и коммуникационной аппаратуры

Операционные усилители с токовой обратной связью LMН6723 (одиночный), LMН6724 (сдвоенный) и LMН6725 (четверенный) разработаны фирмой National Semiconductor для применения

в видео- и коммуникационной технике и имеют высокое быстродействие при малом потреблении. Их полоса пропускания до 370 МГц, ток покоя 1 мА, выходной ток  $\pm 110$  мА. Неравномерность АЧХ в полосе до 100 МГц не более 0,1 дБ, дифференциальное усиление и фаза нормируются. Напряжение питания 4,5...12 В. Выпускаются в различных корпусах.

www.prochip.ru  
тел. (095) 234-0636

# Современные промышленные датчики тока

Андрей Данилов (Москва)

В статье приведён обзор промышленных датчиков тока, основанных на различных физических принципах и работающих в диапазонах токов от единиц микроампер до десятков килоампер.

Достоверное измерение токов в энергетическом и управляющем оборудовании является важным аспектом обеспечения высокой надёжности и безопасности промышленных систем и электронных приборов. Специализированные датчики также применяются для определения разбаланса токов, мониторинга и диагностики цепей, запуска схем защиты, обнаружения отказов электрооборудования и аварийных состояний различных типов нагрузок.

Существует множество методов измерения тока, однако в промышленности наиболее широко применяются три: резистивный, на основе эффекта Холла и трансформатора тока; последний может быть использован только в цепях переменного тока. Датчики тока, реализованные на базе указанных методов, имеют свои достоинства и недостатки, определяющие области их применения. В таблице 1 представлены основные характеристики перечисленных методов измерения.

Резистивные датчики – самые дешёвые, линейные и точные. Однако им присущи потери, вносимые в цепь измерения, отсутствие гальванической развязки, ограничение полосы пропускания, обусловленное паразитной индуктивностью большинства мощных резисторов, а также саморазогрев и термоЭДС при больших токах, снижающие точность измерения. Низкоиндуктивные измеритель-

ные резисторы существенно дороже, но могут быть использованы для измерения токов в диапазоне частот до нескольких мегагерц. Для усиления или обработки напряжения, выделяющегося на токочувствительном резисторе, необходим дифференциальный усилитель или компаратор, обладающий достаточным КОСС, особенно вблизи питающих напряжений.

Первые промышленные датчики на основе эффекта, открытого в 1897 г. американским физиком Эдвином Холлом (Edwin H. Hall, 1855–1938), были разработаны в конце 1960-х. Однако широкое использование интегральных и гибридных датчиков тока на основе эффекта Холла долгое время сдерживалось их высокой стоимостью. К началу 1990-х были разработаны новые технологии, позволившие значительно снизить себестоимость производства самих ячеек Холла и интегральных схем на их основе. Это обусловило бурный рост предложения промышленных датчиков тока и других магниточувствительных полупроводниковых приборов.

Эффект Холла заключается в появлении напряжения на концах полоски проводника или полупроводника, помещённого перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (см. рис. 1). Для меди напряжение Холла составляет  $\pm 24$  мкВ/кГс, для полупроводника – свыше  $\pm 110$  мВ/кГс (с учётом направлений магнитного по-

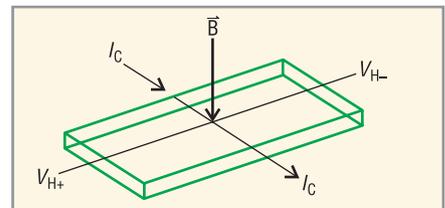


Рис. 1. Возникновение ЭДС Холла (VH)

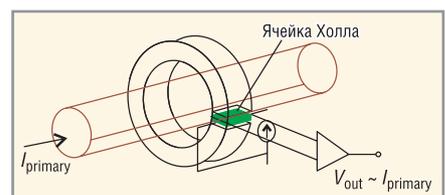


Рис. 2. Холловский датчик тока разомкнутого типа

ля и тока), что вполне достаточно для построения промышленных датчиков тока, главными преимуществами которых является отсутствие вносимых потерь и «естественная» гальваническая развязка. В линейных датчиках Холла выходное напряжение пропорционально приложенному магнитному полю, за исключением режимов симметричного насыщения. По сравнению с резистивными датчиками тока, приборы на основе ячейки Холла имеют более узкий частотный диапазон, паразитное напряжение смещения (в некоторых конструкциях), низкую точность, высокую стоимость и требуют для работы внешний источник питания.

На рис. 2 и 3 схематически представлены две основные разновидности датчиков тока на основе эффекта Холла – разомкнутого и замкнутого типов соответственно, где  $I_{\text{primary}}$  – ток в первичной цепи,  $I_{\text{secondary}}$  – ток во вторичной цепи,  $V_{\text{out}}$  – выходное напряжение усилителя, пропорцио-

Таблица 1. Сравнительные характеристики распространённых методов измерения тока

Датчик	Ток	Диапазон измерения, А	Гальваническая развязка	Вносимые потери	Внешний источник питания	Частотный диапазон, кГц	Погрешность измерения тока, %	Относительная стоимость
Резистор	Постоянный	<20	Нет*	Есть	Нет	~100	<1	Очень низкая
	Переменный	Нет*				>500		Низкая
Ячейка Холла	Постоянный и переменный	<1000	Есть	Нет	Есть	~200	<10	Средняя/высокая
Трансформатор тока	Переменный	<1000	Есть	Есть	Нет	Сеть переменного тока	<5	Высокая

\* Возможна с внешним источником питания

нальное току в первичной цепи. Датчики замкнутого типа (с компенсирующей обмоткой) обеспечивают высокую точность, в несколько раз более широкую полосу пропускания и, как правило, не имеют выходного смещения при нулевом токе. Их чувствительность прямо пропорциональна числу витков компенсирующей обмотки. Однако по стоимости они приближаются к трансформаторам тока.

Датчики на базе трансформаторов тока (ТТ) обычно работают на сетевой частоте (50, 60 или 400 Гц) и, естественно, не могут использоваться в цепях постоянного тока. Их стоимость превышает стоимость приборов на основе эффекта Холла. К преимуществам трансформаторных датчиков тока следует отнести отсутствие вносимых потерь и напряжения смещения при нулевом токе, а также гальваническую развязку с высоким пробивным напряжением. Кроме того, они не нуждаются в дополнительном источнике питания. Недостатком ТТ является насыщение сердечника при наличии в первичном токе постоянной составляющей, что приводит к необратимой деградации точности преобразования. Для решения этой проблемы при изготовлении сердечника используют материалы с высокой магнитной проницаемостью, что, однако, увеличивает фазовый сдвиг в цепи измерения, уменьшает динамический диапазон и термостабильность.

Серьезную конкуренцию резистивным датчикам по точности могут составить магнитооптические датчики, в которых измеряемый ток пропорционален поляризации света либо разности фаз когерентного излучения, а также оптические датчики на основе эффекта Фарадея.

Всё большую популярность приобретают магниторезистивные (МР) датчики тока (на базе анизотропного МР-эффекта), которые обеспечивают точность и линейность до 0,1...0,2% при измерении постоянных и переменных (до 500 кГц) токов до 200 А и не вносят потерь. Однако для работы им требуется внешний источник питания и отсутствие внешних магнитных полей. Последняя проблема в значительной мере снимается применением пар магниторезисторов, расположенных последовательно для магнитного поля проводника и

встречно – для магнитного поля внешней помехи. Для получения приемлемой температурной стабильности и высокой помехоустойчивости магниторезисторы ИС датчика, как правило, соединяются по мостовой схеме, а МР-датчики замкнутого типа снабжаются компенсаторами (см. рис. 4). Дополнительными преимуществами магниторезистивных датчиков тока являются: значительно меньшие размеры и вес, а также существенно более высокая чувствительность по сравнению с холловскими датчиками и трансформаторами тока, отсутствие остаточной намагниченности после перегрузки, широкий частотный диапазон благодаря низкой индуктивности магниторезисторов.

В качестве датчиков переменного тока используются и катушки Роговского, которые обрели «второе дыхание» в сочетании с современными недорогими цифровыми процессорами обработки сигналов (ЦПОС, DSP), оборудованными встроенными АЦП и используемыми в данном случае для точного цифрового интегрирования. В результате были разработаны промышленные датчики, в которых погрешность измерения тока в диапазоне от 70 мА до 70 А не превышает 0,1% при 25°С. Принцип работы этих датчиков основан на измерении напряжения на выводах прямоугольной проводящей рамки, размещённой рядом с проводником. Ток, протекающий по проводнику, создаёт вокруг него пропорциональное магнитное поле, изменения которого наводят ЭДС в измерительной рамке (см. рис. 5). Плоскость каждой из соединённых последовательно рамок перпендикулярна силовым линиям поля. Для вычисления тока необходимо проинтегрировать напряжение по

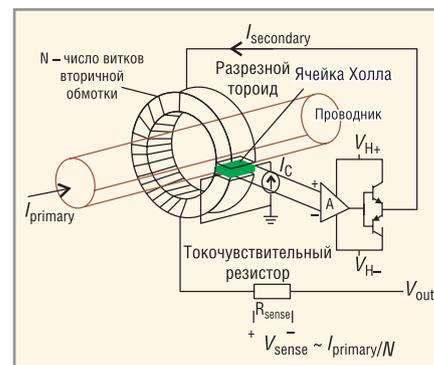


Рис. 3. Холловский датчик тока замкнутого типа

времени. Основной проблемой датчиков на базе катушки Роговского является обеспечение надёжной защиты от внешних магнитных полей, особенно низкочастотных (экранирование здесь неэффективно), которые могут существенно увеличить погрешность измерения. По сравнению с ТТ эти датчики компактнее, легче, дешевле, обеспечивают весьма широкую полосу частот и, поскольку сердечник отсутствует, не насыщаются при больших токах.

Рассмотрим более подробно различные датчики тока, предлагаемые ведущими мировыми производителями.

Практически невозможно найти или придумать электронное устройство, в котором бы не использовались резистивные датчики тока. Высококачественные низкоомные токоизмерительные резисторы выпускают компании Vishay (Vishay Intertechnology), IRC (TT Electronics), Panasonic (Electronic Components Division of Panasonic Industrial Company) и KOA (KOA Speer Electronics). Наиболее популярными являются безвыводные резисторы для поверхностного монтажа с номиналами от 0,01 до 1 Ом, паспорт-

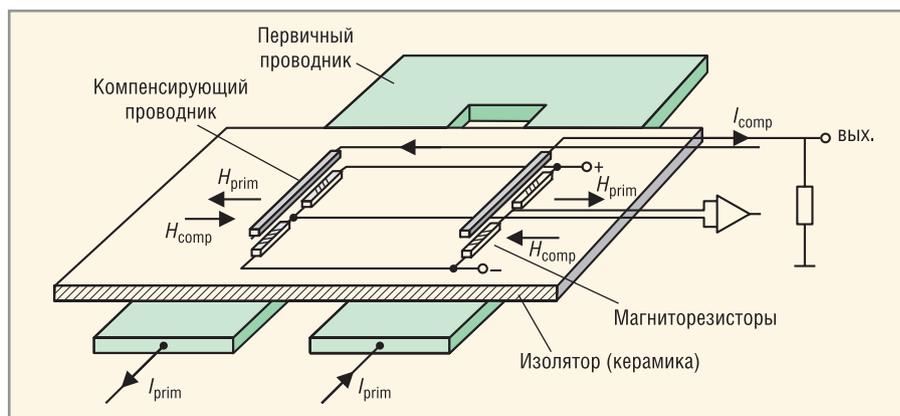


Рис. 4. Магниторезистивный датчик тока

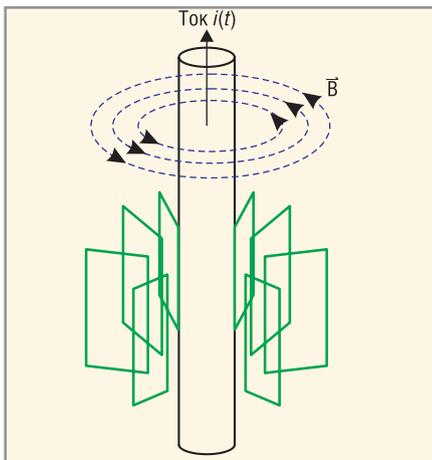


Рис. 5. Схематическое изображение датчика тока с использованием катушки Роговского

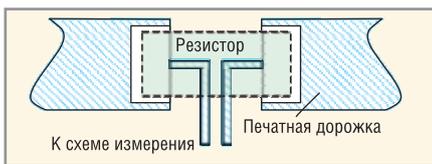


Рис. 6. Посадочное место токоизмерительного резистора (SMD) на печатной плате

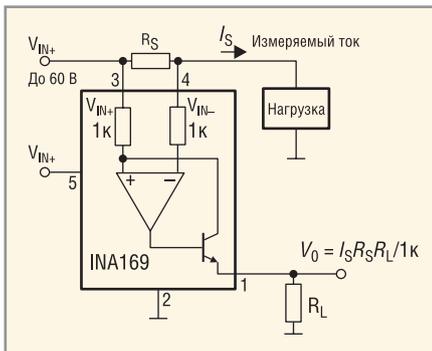


Рис. 7. Измерение тока при помощи специализированного усилителя INA169

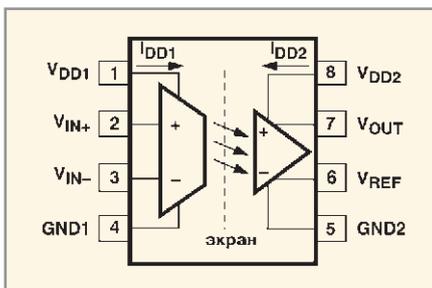


Рис. 8. Цоколёвка ИС типа HCPL-7510/7520

ной мощностью до 5 Вт и допуском  $\pm 0,5\%$  и  $\pm 1\%$ . Номинал, рассеиваемая мощность и ТКС, как правило, выбираются таким образом, чтобы в реальных условиях эксплуатации уход сопротивления резистивного датчика из-за саморазогрева не превышал  $0,1\%$  ( $1000 \text{ ppm}$ ) при максимальном падении напряжения порядка  $100 \text{ мВ}$ . Для обеспечения высокой разрешающей способности измере-

ния, с учетом шумовых параметров большинства специализированных ИС для измерителей тока предпочтительным является номинал  $0,02 \text{ Ом}$ , вносящий минимальное возмущение в измеряемую цепь с током  $5 \text{ А}$ . В цепях с большими токами используют резисторы  $0,00025 \dots 0,01 \text{ Ом}$ . Для особо точных измерений применяют резисторы с четырьмя выводами, два из которых являются токовыми, а два других – потенциальными (т.н. схема Кельвина), либо выполняют специальный рисунок печатной платы с отводами для измерительной схемы (см. рис. 6). В таблицах 2 и 3 представлены основные серии токоизмерительных резисторов упомянутых выше производителей.

Технология Power Metal Strip® (серии WSL, WSR), разработанная и запатентованная компанией Vishay, обеспечивает паспортную мощность в диапазоне температур до  $70^\circ\text{C}$  и половину мощности при температуре  $175^\circ\text{C}$  (серия WSR). Паразитная индуктивность резисторов серии WSL составляет  $0,5 \dots 5 \text{ нГн}$ , ТКС – от  $\pm 50$  до  $\pm 275 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  ( $\pm 15$  для серий WSLxxxxE). Резисторы серии WSK-2512 имеют четырёхвыводную конструкцию и ТКС от  $\pm 35$  до  $\pm 250 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Металлопленочные резисторы серии WSF обеспечивают ТКС от  $\pm 25$  до  $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Проволочные резисторы серии WSC герметизированы эпоксидной смолой или термопластиком, а новейшей серии WSZ – цементом или кремнием. Паразитная индуктивность проволочных резисторов серии WSN снижена при помощи бифилярной намотки.

Металлофольговые резисторы серии CSM обеспечивают ТКС не более  $\pm 15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , долговременную стабильность  $\pm 0,1\%$  и оборудованы несимметрично раздвоенными полосковыми выводами (только CSM3637).

Высокотемпературные резисторы серии ERJ-M1W производства компании Panasonic имеют паразитную индуктивность не более  $1 \text{ нГн}$ . Керметные толстопленочные резисторы серий ERJ-L и ERJ-R снабжены трёхслойными электродами.

Керамические огнестойкие проволочные резисторы серии 4LPW производства компании IRC оборудованы четырьмя выводами, имеют ТКС не более  $\pm 40 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  и выдерживают постоянный ток до  $20 \text{ А}$ .

В таблице 4 приведены основные параметры четырёхвыводных токоизмерительных резисторов большой мощности американской компании KERSO. При установке на алюминиевый теплоотвод площадью  $950 \text{ см}^2$  и толщиной  $5 \text{ мм}$  резисторы могут работать в измерительных схемах с падением напряжения до  $1 \text{ В}$ .

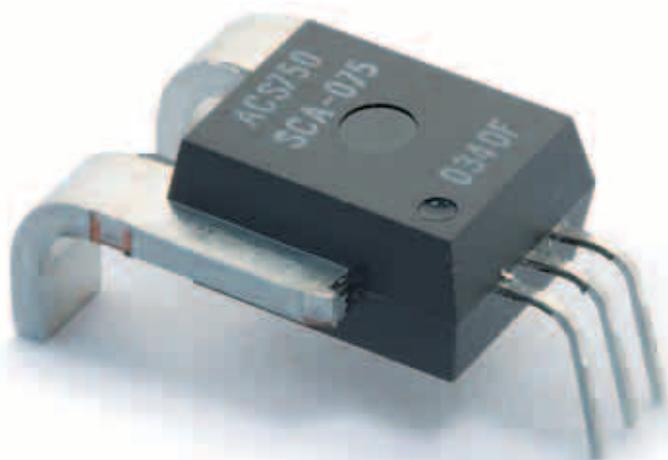
Высокочастотные проволочные четырёхвыводные резисторы серии SM-4 производства американской фирмы Precision Resistor имеют номиналы  $0,005 \dots 0,03 \text{ Ом}$  и паспортную мощность от  $1,25 \text{ Вт}$  до  $7,5 \text{ Вт}$ . Отличительными особенностями этих резисторов являются исключительно малый допуск  $\pm 0,005\%$ , очень низкий ТКС ( $0 \dots \pm 15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) и высокая долговременная стабильность ( $\pm 0,005\%$  за год).

Для обработки напряжения на токоизмерительных резисторах применяются как стандартные дифференциальные измерительные усилители, например, INA118, MAX4372 и аналогичные, так и специализированные ИС, например, типа INA169 фирмы Texas Instruments/Burr-Brown, схема включения которой приведена на рис. 7. Потребляемый ток ИС составляет всего  $60 \text{ мкА}$ , полоса пропускания – до  $440 \text{ кГц}$ , типовое значение КОСС =  $115 \text{ дБ}$  на постоянном токе. В диапазоне падения напряжения  $V_{\text{SENSE}} = 10 \dots 150 \text{ мВ}$  на токочувствительном резисторе  $R_s$  крутизна преобразования равна  $1 \text{ мА}/\text{В}$  (выходное сопротивление  $1 \text{ ГОм}$ ), погрешность линейности не превышает  $\pm 0,1\%$  (типичное значение  $0,01\%$ ), максимальное значение полной погрешности измерения составляет  $\pm 2\%$  (типичное  $0,5\%$ ).

Компания International Rectifier выпускает высоковольтные (до  $600 \text{ В}$ ) специализированные ИС типа IR2170/2175, предназначенные для работы в резистивных датчиках тока. ИС преобразуют падение напряжения в ШИМ-сигнал с несущей частотой  $130 \text{ кГц}$ , что удобно для построения схем управления двигателями, а также активными нагрузками.

Для обеспечения гальванической развязки резистивного датчика тока и схемы управления компания Agilent Technologies выпускает микросхемы HCPL-7510/7520, цоколёвка которых приведена на рис. 8. Испытательное напряжение ИС составляет  $3750 \text{ В}$  с.к.з. в течение  $1 \text{ мин}$ . Гальва-

# Высокая точность измерений, хорошая повторяемость характеристик



**Датчики тока фирмы ALLEGRO**  
серии ACS750 на эффекте Холла

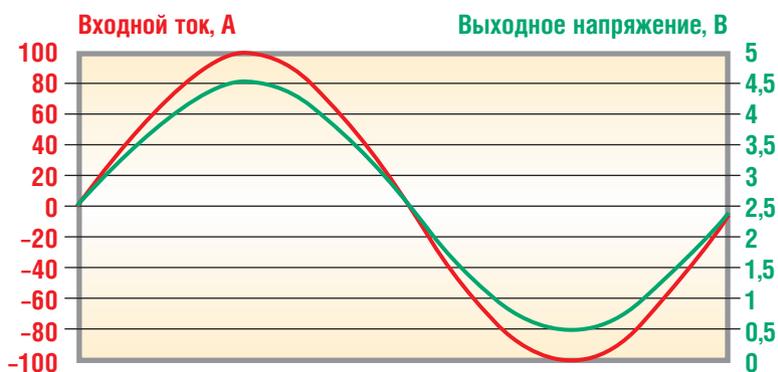
## ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Высокое напряжение изоляции 2500 В
- Малое внутренне сопротивление 120 мОм
- Погрешность измерений менее 1%
- Датчики на 50, 75 и 100 А
- Расширенный температурный диапазон -40...+150°C

## ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Датчик имеет интегрированную силовую шину
- Напряжение на выходе датчика пропорционально току на его входе
- Возможность измерения постоянного и переменного тока

## ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДАТЧИКА ОТ ТОКА



## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Автомобильная электроника
- Источники питания
- Бытовая техника
- Управление электроприводом

**Таблица 2. Токоизмерительные резисторы, выпускаемые ведущими мировыми производителями для поверхностного монтажа (SMD)**

Производитель	Серия	Паспортная мощность, Вт	Диапазон сопротивлений, Ом	Допуск, ±, %	
Vishay	WSL0805	0,125; 0,5	0,01...0,2	0,5; 1	
	WSL1206	0,25; 0,5	0,002...0,2		
	WSL2010	0,5; 1	0,001...0,5		
	WSL2512	1; 2	0,001...0,5; 0,01		
	WSL1506E	0,25	0,5...10K		
	WSL2010E	0,5	0,5...10K		
	WSL2512E	1	0,5...10K		
	WSR-2	2	0,001...1		0,5; 1; 5
	WSR-3	3	0,001...0,2		
	WSC-1/2	0,5	0,1...4,99		
	WSC-1	1	0,1...2,77K		
	WSC-2	2	0,1...4,92K		
	WSC2515	1	0,1...2,77K		
	WSC4527	2	0,1...4,92K		
	WSC6927	3	0,1...8K		
	WSF2012	0,5	5...1,43K		
	WSF2515	1	26,5...10K		
	WSF4527	2	10...100K		
	WSL3637	3	0,003...0,01	0,5; 1	
	WSK2512	1	0,001...0,025	1; 2; 5; 10	
WSZ6720	1,8	1...3,3K	1; 2; 5; 10		
WSZ7532	3,75	1...15K	0,1; 0,5		
CSM2512	1	0,003...0,2	0,1; 0,5		
CSM3637	2; 3	0,002...0,2	0,1; 0,5		
IRC	LR(F)1206	0,5	0,005...1	1; 2; 5	
	LR(F)2010	1	0,003...1		
	LR(F)2512	2			
	LRF3W	3			0,003...0,1
	SC3	3	1...350		
	D2PAK (T0263)	25	0,2...1K	1	
	WSML1	1	0,005...10K	1; 5	
	WSML2	2			
	OARS	1	0,003...0,05	1; 2; 5	
	CSS		0,0005...0,002	1; 3; 5	
	PWC0805	0,125	1...10M	0,5; 1; 5	
	PWC1206	0,33			
	PWC2010	0,75			
	PWC2512	1,5			
	CSC/GSL	5	0,001...0,005	1; 5	
	OLV	1; 3; 5	0,003...0,03	5; 10	
	WSM1	1	0,01...1K	1; 5	
WSM2	2	0,01...2K			
WSM3	3	0,01...10K			
KOA	SR73	–	0,024...10	1; 2; 5	
	SL1	1	0,005...1M	1; 5	
	SL2	2			
	NPR1	1	0,01...22M		
	NPR2	2			
	TLR3A	1			0,001...0,004
	TLR2B	0,5	0,002...0,02	1	
	UR732A	0,125	0,033...0,1	1; 5	
	UR732B	0,25	0,002...0,02		
	LR72	0,25; 0,5; 1	0,002...0,008	5	
CSR	1; 2	0,005...0,05	0,5; 1		
Panasonic	ERJ-M1W	1	0,002...0,02	1; 5	
	ERJ-xR	–	0,1...9,1	1; 2; 5	
	ERJ-LOx	–	0,047...0,1	5	
	ERJ-Lxx	–	0,002...0,1	1; 5	

ническая развязка выдерживает синфазную помеху до 15 кВ/мкс при постоянном синфазном напряжении 1000 В. Полоса пропускания равна 100 кГц, погрешность линейности 0,06%, погрешность коэффициента передачи ±3% (7510) и ±5% (7520). ИС выполнены в стандартных корпусах DIP8.

Компания Sypris предлагает широкую номенклатуру функционально законченных холловских датчиков тока разомкнутого и замкнутого типов производства F.W.Bell, основные характеристики которых приведены в таблицах 5 и 6 соответственно.

Компания Allegro MicroSystems выпускает разнообразные датчики Холла с логическим и линейным выходами, а также прецизионные линейные датчики тока разомкнутого типа. В таблице 7 приведены основные параметры ИС датчиков Холла с линейным выходом, со стабилизацией прерыванием, компенсирующей постоянное смещение в канале измерения (серии A132xx и A351xx), и без стабилизации прерыванием (модель UGN3503). В данном случае эквивалентная точность ИС определена как изменение выходного напряжения в рабочем диапазоне температур, поделенное на типовую чувствительность.

На рис. 9 приведена функциональная схема малогабаритных интегрированных (со встроенной магнитной цепью) датчиков тока серий ACS750/752 компании Allegro MicroSystems, реализованных на основе ИС датчиков Холла со стабилизацией прерыванием (Dynamic Offset Cancellation). Стабилизация прерыванием заключается в периодическом (с частотой 170 кГц) переключении квадратных (перпендикулярных друг другу) выводов ячейки Холла при помощи входного коммутатора, последующим дифференциальным усилением, стробированием и запоминанием плоского участка импульса при помощи устройства выборки-хранения и НЧ-фильтрацией полезного сигнала. Фактически переключаются выводы питания и сигнала ячейки Холла, что позволяет компенсировать некоторые составляющие напряжения смещения (в том числе при нулевом токе), обусловленные градиентами сопротивления, геометрическими неоднородностями, пьезорезистивными эффектами и т.д. Высо-

кая точность датчиков обеспечивается оригинальным технологическим процессом самосовмещения, используемым при сборке, и заводской подстройкой резисторов на кристалле ИС, в ходе которой с большой точностью совмещаются линейные области усилителя и магнитной цепи.

На рис. 10 показан внешний вид и цоколевка датчиков. Они выпускаются на номинальный ток  $\pm 50$ ,  $\pm 75$  и  $\pm 100$  А, который указан в их обозначении, например, ACS750хСА-100, где буква «х» заменяет буквы S, L или E, соответствующие температурному диапазону прибора (см. табл. 6). Датчики не требуют какой-либо подстройки в конечном устройстве и вносят очень малые потери в измеряемую цепь, поскольку сопротивление между выводами 4 и 5 первичной цепи (см. рис. 10) равно всего 130 мкОм. Максимально допустимый ток составляет 225 А при длительности импульса 1 с и скважности 10. Микросхемы выдерживают в течение 1 мин испытательное напряжение 3000 В с.к.з./60 Пд, приложенное между выводами 1, 2, 3 и 4, 5. Полоса пропускания ИС составляет 13 кГц, время задержки 4 мкс, время нарастания выходного напряжения 26 мкс. Типовая чувствительность 100-амперных приборов равна 19,75 мВ/А, 50-амперных – 40 мВ/А. Размах шумового напряжения на выходе, измеренный в полосе 24 кГц, составляет 14 мВ для ИС с номинальным током 50 А и пропорционально снижается при расширении диапазона измерения тока. Полная погрешность измерения при окружающей температуре 25°C составляет  $\pm 1\%$  для приборов ACS752-100 и  $\pm 1,5\%$  для приборов ACS750-100. Максимальное напряжение питания равно 16 В. Встроенная схема обеспечивает защиту ИС при импульсных перенапряжениях на выводах.

Фирма Sentron производит недорогой линейный холловский датчик типа CSA-1V, размещенный в корпусе SOIC-8 и оптимизированный для измерения постоянного и переменного (до 100 кГц) тока. ИС выполнена по стандартной КМОП-технологии с дополнительным ферромагнитным слоем, который используется в качестве концентратора магнитного потока и обеспечивает повышение чувствительности схемы измерения. Датчик предназначен для установки непосредственно над печатной дорожкой

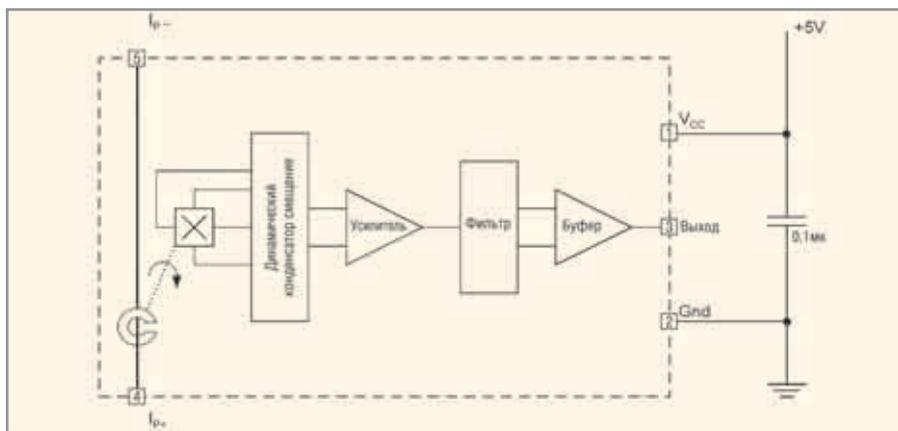


Рис. 9. Функциональная схема интегрированных датчиков тока серии ACS75х фирмы Allegro MicroSystems

(строго параллельно её поверхности), ток которой необходимо измерять. Максимальный ток, регистри-

руемый прибором, составляет  $\pm 30$  А и может быть подстроен путем изменения геометрии проводника печатной

Таблица 3. Токоизмерительные резисторы, выпускаемые ведущими мировыми производителями для навесного монтажа

Производитель	Серия	Паспортная мощность, Вт	Диапазон сопротивлений, Ом	Допуск, ±, %
Vishay	SR5	5	0,004...0,05	1; 5
	SPU	1; 2; 4; 5	0,001...0,5	1; 0,25; 0,5; 1; 3; 5
	CPL	3; 5; 7; 10; 15	0,01...0,1	1; 2; 3; 5; 10
	CPSL			3; 5; 10
	SPR	1; 3; 5	0,0005...0,25	0,5; 1; 1,5
	LVR	1; 3; 5; 10	0,005...0,8	1; 3; 5; 10
IRC	OAR	1; 2; 3	0,005...0,1	1; 5
	TFP (T0220)	20	0,01...1K	1; 5; 10
	LOB	1; 3; 5	0,005...0,1	1; 5
	PLW	3; 5; 7; 10; 15	0,005...0,18	1; 2; 3; 5; 10
	4LPW			
	PWRL	3; 5; 7; 10	0,01...0,18	
	CSL	5	0,00025...0,0025	1

Таблица 4. Токоизмерительные резисторы компании КЕРСО

Модель	Сопротивление, Ом	Конструкция выводов	Максимальная рассеиваемая мощность, Вт
KT1915	1,0	Под пайку	50
KT1385	0,67		
KT1399	0,5		
KT1386	0,333		
KT1598	0,2		
KT2356	0,1		
KT2713	0,01		
KT2537	0,0625		
KT2536	0,05		
KT2480	0,033		
KT2330	0,02		
KT2325	0,01		
KT2536	0,05		
KT2714	0,001		
KT3146	1,0	Под винт	100
KT3126	0,1		
KT3130	0,01		
KT3131	0,001		

платы в месте установки ИС. Время срабатывания датчика не превышает 6 мкс. Номинальное напряжение питания +5 В, линейный диапазон выходного сигнала 2,5±2,0 В.

Компания Asahi Kasei Electronics предлагает широкий выбор холловских датчиков. Линейные датчики тока выпускаются в шести сериях и рассчитаны на ток от 200 мА до 800 А. Датчики тока разомкнутого типа серии FO обеспечивают диапазон изме-

рения от 100 А до 500 А (макс. 800 А). Для измерения малых токов до 200 мА (макс. 1 А) предназначены приборы серии FS, также разомкнутого типа. Малогабаритные (20×20×18 мм) датчики серии TD замкнутого типа предназначены для монтажа на печатную плату (в отверстия), обладают высокой точностью (±1% плюс смещение при нулевом токе ±30 мВ) и линейностью (коэффициент нелинейности не более 0,3%), широкой полосой

пропускания (0...100 кГц), малым временем срабатывания (не более 1 мкс при скорости изменения первичного тока 100 А/мкс) и работают в диапазоне от 5 А до 50 А (макс. 125 А). Напряжение питания ±14...17 В. Испытательное напряжение составляет 2500 В/60 Гц в течение 1 мин. Более крупные (30×30×15,5 мм) приборы серии ТВ имеют близкие точностные и динамические характеристики, но рассчитаны на диапазон измерения от 50 А до 150 А (макс. 375 А). Датчики серии FB (от 100 А до 500 А) и SB (от 25 А до 120 А) также реализованы по замкнутой схеме, выполнены в том же конструктиве, но имеют более высокую линейность (лучше 0,2%) при аналогичных динамических параметрах и полной точности ±1%; напряжение питания ±12...15 В.

Компания Inductive Technologies, LLC (i-tech), выпускает малогабаритные трансформаторы тока сетевой частоты (50...400 Гц) серии TR, предназначенные для вертикальной установки на печатную плату. Диаметр отверстия для проводника первичного тока (макс. 100 А с.к.з.) составляет 14,22 мм. Габариты трансформатора 35×35×14,3 мм. Приборы серии TR имеют 5 модификаций, отличающихся числом витков вторичной обмотки (от 300 до 3000).

Американская компания CR Magnetics специализируется на изготовлении различных магнитопроводов, трансформаторов и функционально законченных датчиков на их основе. Новая серия датчиков тока повышенной точности CR4100 (см. рис. 11) реализована на базе трансформаторов тока, позволяет измерять «настоящее» с.к.з. переменного тока (до 150 А) с повышенным содержанием гармоник и удовлетворяет всем международным стандартам. Диапазон измерения двух- и трёхканальных приборов ограничен током 30 А. Датчики данной серии имеют потенциальный выход 0...5 В или токовый выход 4...20 мА и питаются от 24-В источника постоянного тока. Полоса рабочих частот составляет 20 Гц...5 кГц, максимальное время срабатывания 250 мс, основная погрешность измерения 0,5%, температурный диапазон 0...60°C, температурный дрейф выходного сигнала 500 ppm/°C, напряжение изоляции – 2500 В с.к.з.

Малогабаритные трансформаторы тока серии CR8750 предназначе-

Таблица 5. Холловские датчики тока компании F.W.Bell (разомкнутого типа)

Модель	Номинальный ток, А	Номинальное выходное напряжение, В	Погрешность линейности, ±, %	Полоса пропускания, кГц (от постоянного тока)	Диаметр отверстия, мм	Конструктивное исполнение		
MS-15	15	1,7	1	20	1,024	Для печатного монтажа		
MS-30	20	1,2			1,828			
BB-25	25	1		60	10,16			
BB-100	100	5						
BB-150	150	6	0,6	10	20,32	Приборное		
BB-300	300		0,7					
BB-600	600		1,25					
BVP-150F	150		0,6	60				
BVP-300F	300		0,7	10				
BVP-600F	600		1,25	10				
BVP-150H	150		0,6					
BVP-300H	300		0,7					
BVP-600H	600		1,25	50			9,652	Универсальное
IHA-25	25		1					
IHA-100	100		5					
IHA-150	150		0,2	1,5			1	20,32
PI	350							
PI-600	600	2	10	0,5	42,418	Приборное		
IA-0100	100	–						
IA-0250	250	0,6						
IA-0500	500							
IA-1000	1000							
IA-2000	2000							
IA-3000	3000							
IF-0100	100						25	1
IF-0250	250							
IF-0500	500							
IF-1000	1000							
IF-2000	2000							
IF-3000	3000							
RS-100-A	100						4	0,7
RS-200-A	200							
RS-300-A	300							
RS-400-A	400							
RS-500-A	500							
RS-600-A	600							
RS-1000-A	1000							
RSS-100-A	100	1,6						
RSS-200-A	200							
RSS-300-A	300							
RSS-400-A	400							
RSS-500-A	500							
RSS-600-A	600							
RSS-1000-A	1000							

ны для горизонтального монтажа на печатную плату, при этом их высота не превышает 12 мм. Выходное напряжение и диапазон измерения тока сетевой частоты (60...400 Гц) зависят от числа витков вторичной обмотки (230 или 1000) и нагрузочного резистора (10...1000 Ом) и могут достигать 7 В с.к.з. и 50 А с.к.з. соответственно. Напряжение изоляции 600 В. Диаметр отверстия для проводника первичного тока равен 6,35 мм.

Кроме большой номенклатуры трансформаторов тока компания CR Magnetics выпускает одно-, двух- и трёхканальные цифровые датчики тока серии Data Stream с интерфейсом RS485 (GPIB), рассчитанные на диапазоны 1, 5, 15 и 25 А с.к.з. Базовая погрешность датчиков не превышает 0,5%, диапазон рабочих частот составляет 45...65 Гц, рабочая температура 0...50°C, напряжение изоляции 2500 В, коэффициент перегрузки по измеряемому току 20 дБ, напряжение питания 24 В ± 10%, потребляемая мощность менее 250 мВт. Встроенный дельта-сигма-АЦП имеет разрешающую способность 16 разрядов. Результаты заводской калибровки датчиков заносятся во встроенную энергонезависимую память. Скорость передачи данных через интерфейс RS485 выбирается пользователем из ряда 1200, 2400, 4800, 9600, 19 200 бит/с, предустановленное значение – 9600 бит/с. Выводы интерфейса оборудованы схемами подавления импульсных помех и защиты от статического разряда до 15 кВ. Внешний вид цифровых датчиков аналогичен внешнему виду приборов, показанных на рис. 11. Единственное отличие – два светодиодных индикатора на верхней панели, отражающие текущее состояние датчика и интерфейса.

Фирма Manutech выпускает малогабаритные высокочастотные (1...150 кГц) трансформаторы тока серии MN420, предназначенные для вертикальной установки на печатную плату. По специальному заказу изготавливаются ТТ, работающие в диапазоне частот 20 кГц...20 МГц (!). Различные модификации приборов содержат от 50 до 1000 витков вторичной обмотки (точность ±1%) с индуктивностью от 5 до 2000 мГн. Диаметр отверстия для проводника первичного тока составляет 4,57 мм. Напряжение

изоляции 3000 В с.к.з. Габариты трансформаторов 20,32 × 17,02 × 9,53 мм.

Компания NK Technologies (США) предлагает большую номенклатуру промышленных датчиков тока и релейной автоматики на их основе. В сериях ATQ, AT/ATR, ATP и DT представлены линейные датчики переменного и постоянного тока до 2000 А как на базе трансформаторов тока, так и ячейки Холла (серия DT). Приборы имеют выход по напряжению (от 0 до 3 В, 5 В или 10 В) или току (4...20 мА), диапазон выходного сигнала выбирается переключками. Все датчики калибруются на заводе-изготовителе до погрешности менее 1%. Датчики серии ATQ (максимальный ток 5, 50 или 200 А, полоса частот 10...400 Гц, время срабатывания 100 мс) оборудованы цифровым частотным выходом (до 10 кГц) с оптической развязкой и обеспечивают разрешающую способность 0,01% при напряжении изоляции 5000 В с.к.з.

На рис. 12 показано семейство функционально законченных магниторезистивных датчиков постоянно-

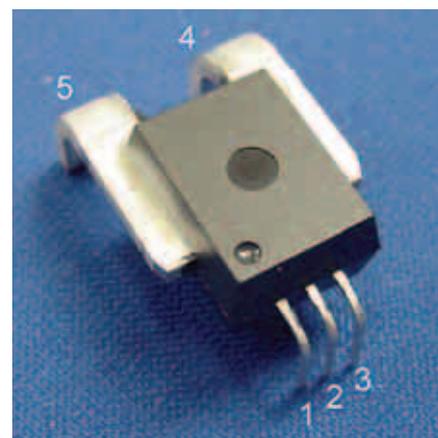


Рис. 10. Внешний вид и цоколёвка датчиков ACS775х

го и переменного (до 100 кГц) тока серии NT, выпускаемых компаний F.W.Bell, а на рис. 13 приведена их цоколёвка. Цифры в названии датчика (см. рис. 12) обозначают номинальный ток. Максимальный ток в течение 3 с может быть втрое больше номинального, т.е. ±150 А для датчика NT-50 или ±15 А для NT-5. Сопротивление первичной цепи не превышает 12 мОм для NT-5 и 150 мкОм для NT-

Таблица 6. Холловские датчики тока компании F.W.Bell (замкнутого типа)

Модель	Номинальный ток, А	Номинальный выходной ток, мА	Точность при 25°C, ±, %	Полоса пропускания, кГц (от постоянного тока)	Первичное отверстие, мм	Конструктивное исполнение
CLS-25	25	25	0,5	200	Нет (выводы)	Для печатного монтажа
CLN-25						
CLN-50	50	150			13,462 × 9,909	
CLN-100	100				Нет (выводы)	
CLN-50SP1	50	100		Ø23,012		
CLN-100SP1	100					
CLN-200	200	150		Нет (шина)		
CLN-300	300				150	
CLN-300SP1						
CLN-500SP1	500	100		100	Ø25,984	Приборное
CLN-500	1000	200	150		Ø43,942	
CLN-1000			300	150	0,3	Ø22,987
CLO-300	500	100	0,3	100	Ø26,01	
CLO-500	300				100	24,892 × 19,05
LS-300	1000	200			Ø43,942	

Таблица 7. ИС ячеек Холла с линейным выходом компании Allegro MicroSystems

Серия (модель)	Напряжение питания, В	Типовая чувствительность при 25°C, мВ/Гс	Эквивалентная точность, не менее, ±, Гс	Рабочий температурный диапазон, °С	Корпус	
A1321x	4,5...5,5	5	10	-40...85 (E); -40...150 (L)	LH, UA	
A1322x		3,125				
A1323x		2,5				
UGN3503	4,5...6	1,3	-	-20...85 (S)	LT, UA	
A3515x	4,5...5,5	5	10	-40...85 (E); -40...150 (L)	UA	
A3516x		2,5				
A3517x		5	20			
A3518x		2,5				-20...85 (S); -40...150 (L)



Рис. 11. Внешний вид датчиков тока повышенной точности CR4100 компании CR Magnetics

50. Номинальное выходное напряжение датчиков составляет  $\pm 2,5$  В, испытательное напряжение – 3500 В. При комнатной температуре полная погрешность измерения не превышает  $\pm 0,8\%$ , погрешность линейности не более  $\pm 0,1\%$ . Температурный дрейф чувствительности составляет  $\pm 0,01\%/^{\circ}\text{C}$ . Максимальное напряжение смещения в рабочем диапазоне  $-25..85^{\circ}\text{C}$  равно  $\pm 35$  мВ. Датчики серии NT обеспечивают превосходные динамические характеристики: при скорости нарастания первичного тока 100 А/мкс время срабатывания не превышает 150 нс, а время нарастания – 1 мкс для NT-50 и 1,7 мкс для NT-5 и NT-15. Напряжение питания  $\pm 12..15$  В, потребляемый ток не более 40 мА. Масса приборов составляет 4..6,5 г, габариты  $35 \times 23,5 \times 7,3$  мм.

Компания Honeywell International производит полностью герметизированные магниторезистивные датчики замкнутого типа серии



Рис. 12. Магниторезистивные датчики тока серии NT производства компании F.W.Bell

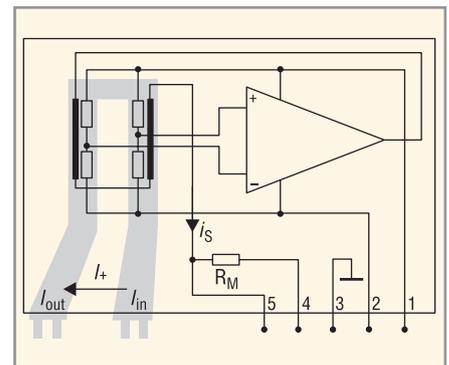


Рис. 13. Цоколёвка датчиков серии NT

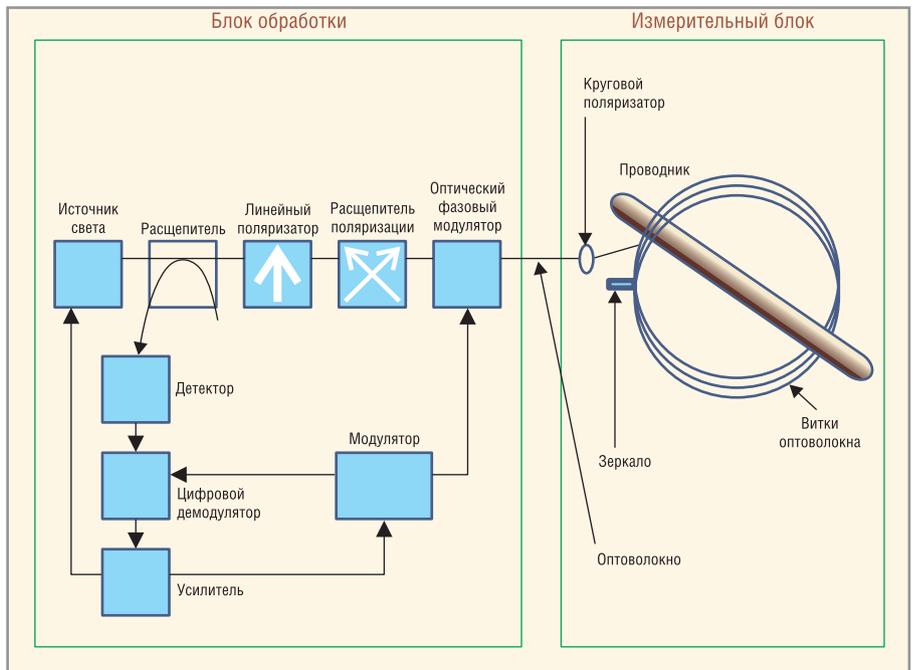


Рис. 14. Функциональная схема измерителя тока на базе датчика NXCT

CSNX, выполненные по патентованной технологии. В датчиках использованы заказная бескорпусная ИС и МР-сборка. Номинальный ток прибора CSNX25 составляет 25 А с.к.з. и может корректироваться переключателями до 12 А или 8 А, максимальный ток  $\pm 56$  А. Номинальный выходной ток 12,5 мА с.к.з. Токовый выход позволяет использовать различные нагрузочные резисторы для получения эквивалента напряжения, определяемого потребностями дальнейшей обработки сигнала. Погрешность датчика при  $25^{\circ}\text{C}$  и номинальном токе не превышает  $\pm 0,24\%$ , в рабочем диапазоне температур  $-40..85^{\circ}\text{C}$  –  $\pm 0,32\%$ . Дрейф напряжения смещения не более 3,2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Погрешность линейности менее 0,1%. Испытательное напряжение равно 5000 В с.к.з./50 Гц в течение 1 мин. Напряжение питания  $+5 \text{ В} \pm 5\%$ , потребляемый ток 12 мА (без нагрузки); имеется встроенный источ-

ник опорного напряжения  $+2,5$  В (погрешность  $\pm 10$  мВ). Время срабатывания датчика не превышает 200 нс при скорости изменения тока более 100 А/мкс. Полоса пропускания по уровню  $-1$  дБ равна 200 кГц. Габариты прибора  $34 \times 12,6 \times 25,5$  мм, масса 20 г. Компания Honeywell также выпускает холловские датчики тока замкнутого типа (серия CSNA).

На основе оптического датчика NXCT построена схема измерителя тока фирмы NxtPhase, использующая эффект Фарадея (рис. 14). Источник света посылает световой поток по световоду на линейный поляризатор, затем на расщепитель поляризации, который создаёт два линейно поляризованных потока, и, наконец, на оптический фазовый модулятор. Световые потоки подаются по оптоволокну на измерительный блок, где они проходят через четвертьволновый круговой поляриза-

тор, придающий им право- и левостороннюю поляризацию, и далее – через токочувствительную петлю вокруг проводника, отражаются от конца оптоволокна и возвращаются тем же путем в блок обработки. Во время прохождения света по петле магнитное поле, наводимое током, протекающим по проводнику, создаёт благодаря эффекту Фарадея пропорциональный току фазовый сдвиг между поляризованными световыми потоками. В блоке обработки световые потоки попадают в оптический детектор, который определяет фазовый сдвиг и преобразует его в аналоговый или цифровой сигнал. Описанная система обеспечивает точность измерения 0,15...0,3% в диапазоне токов 1...3000 А (с.к.з.) и в полосе частот 10 Гц...6 кГц; лабораторные образцы имеют погрешность 0,03%. Аналогичные по принципу действия системы

предлагают компании АВВ (датчик типа FOCT) и KVH, однако их параметры и подробные описания не публикуются. Имеются сообщения о сотрудничестве АВВ и KVH по доведению оптических систем измерения тока до промышленного использования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Emerald P.* 'Non-Intrusive' Hall-Effect Current-Sensing Techniques Provide Safe, Reliable Detection and Protection for Power Electronics. Application Information STP98-1. Allegro MicroSystems.
2. *Magnetic Cores for Hall Effect Devices.* Technical Bulletin HED-01. Magnetics Division of Spang & Company, 1997.
3. *Dickinson R. and Milano S.* Isolated Open Loop Current Sensing Using Hall Effect Technology in an Optimized Magnetic Circuit. Allegro MicroSystems, 2002.

4. *Koon W.* Current Sensing for Energy Metering. Precision Converters Division. Analog Devices ([www.analog.com/energymeter](http://www.analog.com/energymeter)).
5. [www.vishay.com](http://www.vishay.com).
6. [www.kepcopower.com](http://www.kepcopower.com).
7. [www.precisionresistor.com](http://www.precisionresistor.com).
8. [www.ti.com](http://www.ti.com).
9. [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com).
10. [www.agilent.com/semiconductors](http://www.agilent.com/semiconductors).
11. [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com).
12. [www.sypris.com](http://www.sypris.com).
13. [www.gmv.com/electric\\_current/Sentron](http://www.gmv.com/electric_current/Sentron).
14. [www.asahi-kasei.co.jp](http://www.asahi-kasei.co.jp).
15. [www.inductech.com](http://www.inductech.com).
16. [www.crmagnetics.com](http://www.crmagnetics.com).
17. [www.manutech.us](http://www.manutech.us).
18. [www.nktechnologies.com](http://www.nktechnologies.com).
19. [www.fwbell.com](http://www.fwbell.com).
20. [www.honeywell.com/sensing](http://www.honeywell.com/sensing).
21. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com).
22. [www.kvh.com](http://www.kvh.com).
23. [www.abb.com](http://www.abb.com).



## Новости мира News of the World Новости мира

### Erpson предлагает крошечный гиросенсор

Корпорация Epson совместно с NGK разработала самый маленький гиросенсор в своём классе. Прибор XV-3500CB размещён в корпусе размером всего 5 × 3,2 × 1,3 мм. Гиросенсор разработан для использования в системах стабилизации изображения видеокамер и цифровых фотоаппаратов.

[www.epson.co.jp](http://www.epson.co.jp)

### Новый усилитель мощности со встроенным фильтром для 802.11 b/g WLAN-сетей

Компания Skyworks Solutions выпустила новый усилитель мощности SKY65006 из семейства PA Plus™ для беспроводных 802.11 b/g систем. Особенность нового усилителя – его универсальность, возможность работы при более высоких напряжениях возбуждения, что позволяет на 15% поднять выходную мощность, а также встроенный фильтр для подавления гармоник. В новом усилителе на 30% улучшена линейность, сокращены размеры, упрощена топология печатной платы.

Выходная мощность усилителя 17 дБм для 802.11g и 20 дБм для 802.11b, ток потребления 100 и 120 мА, рабочее напряжение 3,3 В, входной и выходной импеданс 50 Ом. При питании от источника напряжением 5 В можно дополнительно

увеличить мощность на 3 дБм. Имеется детектор выходной мощности с температурной компенсацией. Усилитель изготовлен по фирменной InGaP-технологии на биполярных HBT-транзисторах, выпускается в корпусе QFN (quad flat no-lead) с размерами 3 × 3 мм.

[www.skyworksinc.com](http://www.skyworksinc.com)

### Умножитель частоты с тремя петлями ФАПЧ от Texas Instruments

Умножитель частоты CDC5806 в 20-выводном корпусе TSSOP содержит три петли ФАПЧ и не нуждается в дополнительных внешних компонентах. Прибор питается напряжением 3,3 В, обеспечивает джиттер 150 пс и использует входной сигнал частотой 54 МГц, из которого формирует несколько выходных частот. Стоимость в партии 1000 шт. \$2,15.

[www.ti.com](http://www.ti.com)

### ШИМ-контроллеры повышают параметры конверторов

Разработанные для повышения параметров AC/DC- и DC/DC-конверторов ШИМ-контроллеры ISL6840/1/2/3/4/5 фирмы Intersil имеют полосу пропускания усилителя ошибки 5 МГц и время ре-

акции на пиковое значение тока 40 нс. Микросхемы совместимы по цоколёвке со стандартными аналогами, имеют высокостабильный источник опорного напряжения с точностью 1% и работают на частоте до 2 МГц. Ток управления затвором до 1 А, ток потребления 3 мА, диапазон температур –40...+105°C. Стоимость в 8-выводных корпусах MSOP и SOIC соответственно \$1,43 и \$1,28 в партии 100 шт.

[www.intersil.com](http://www.intersil.com)

### Линейка высокоскоростных АЦП от Analog Devices

Семейство АЦП с последовательным выходом AD7274/6 (12 разрядов), AD7277/3 (10 разрядов) и AD7278 (8 разрядов) предназначено для использования в высокоточных высокоскоростных медицинских, оптических системах и системах сбора данных. Микросхемы потребляют 8 мВт от одного источника питания напряжением 2,35...3,6 В, имеют малощумящий высокоскоростной усилитель выборки/хранения, их производительность 3 Msps, нелинейность 1 LSB INL. Выпускаются в корпусах TSOT и MSOP. Стоимость в партиях 1000 шт.: AD7278 – \$1,85; AD7273 – \$3,75; AD7277 – \$3,60; AD7276 – \$6,25; AD7274 – \$6,50.

[www.analog.com](http://www.analog.com)

# Высокоэффективные современные светодиоды

Юрий Давиденко (г. Луганск, Украина)

**В последние годы мы стали свидетелями стремительного развития области техники, основанной на физике полупроводников, – оптоэлектроники. Прежде всего, это проявилось в революционном совершенствовании светодиодов – твердотельных полупроводниковых источников света. Ещё недавно светодиоды были всего лишь устройствами индикации, а сегодня это уже высокоэффективные источники света, которые в ближайшее время преобразят мир искусственного освещения и заменят лампы накаливания.**

Интерес к светодиодам растёт быстрее, чем область их применения в современной электронике и светотехнике. Производители и потребители, продавцы и покупатели – все как будто замерли на старте, боясь отстать один от другого. Попробуем разобраться, почему светодиодам пророчат большое будущее.

## История создания светодиодов

В 1907 году английский инженер Х.Д. Раунд, трудившийся во всемирно известной лаборатории Маркони, случайно заметил, что у работающего детектора вокруг точечного контакта возникает свечение. Всерьез же заинтересовался этим физическим явлением и попытался найти ему практическое применение Олег Владимирович Лосев.

Обнаружив в 1922 году во время своих ночных радиовахт свечение кристаллического детектора, этот тогда ещё 18-летний радиолюбитель не ограничился констатацией факта, а незамедлительно перешёл к оригинальным экспериментам. Стремясь получить устойчивую генерацию кристалла, он пропускал через точечный контакт диодного детектора ток от батарейки. Лосев писал: «У кристаллов карборунда (полупрозрачных) можно наблюдать (в месте контакта) зеленоватое свечение при токе через контакт всего 0,4 мА... Светящийся детектор может быть пригоден в качестве светового реле как безынертный источник света» [1].

Весь мир заговорил об «эффекте Лосева», на практическое применение которого изобретатель успел по-

лучить до своей гибели в 1942 г. четырьмя патентами.

В 1951 г. центр по разработке «полупроводниковых лампочек», действующих на основе «эффекта Лосева», был создан в Америке, где его возглавил К. Леховец. В исследовании проблем, связанных со светодиодами, принял самое деятельное участие и «отец транзисторов» физик В. Шокли.

Вскоре выяснилось, что германий (Ge) и кремний (Si), на основе которых делаются полупроводниковые триоды (транзисторы), бесперспективны для светодиодов из-за слишком большой «работы выхода» и, соответственно, слабого испускания фотонов на p-n-переходе. Успех же сопутствовал монокристаллам из сложных соединений полупроводников – соединений галлия (Ga), мышьяка (As), фосфора (P), индия (In), алюминия (Al) и других элементов.

Однако реализованы на практике эти идеи были лишь в 60...70-е годы, после обнаружения эффективной люминесценции полупроводниковых соединений типа АІІІВ – фосфида (GaP) и арсенида (GaAs) галлия и их твёрдых растворов. В итоге на их основе были созданы светодиоды и таким образом заложен фундамент новой отрасли техники – оптоэлектроники.

Первые имеющие промышленное значение светодиоды с красным и жёлто-зелёным свечением были созданы в 60-е годы на основе структур GaAsP/GaP Ником Холоньяком (США). Внешний квантовый выход был не более 0,1%. Длина волны излучения этих приборов находилась в пределах 500...600 нм – области наи-

высшей чувствительности человеческого глаза, – поэтому яркость их жёлто-зелёного излучения была достаточной для целей индикации. Световая отдача светодиодов при этом составляла приблизительно 1...2 лм/Вт.

Дальнейшее совершенствование светодиодов проходило по двум направлениям – увеличение внешнего квантового выхода и расширение спектра излучения. Велик вклад в эту работу российских учёных, в частности, Ж.И. Алферова с сотрудниками, ещё в 70-е годы разработавших так называемые многопроходные двойные гетероструктуры, позволившие значительно увеличить внешний квантовый выход. Использовались гетероструктуры на основе арсенидов галлия-алюминия, при этом был достигнут внешний квантовый выход до 15% для красной части спектра (световая отдача до 10 лм/Вт) и более 30% – для инфракрасной. Показателен факт присуждения Ж.И. Алферову Нобелевской премии в 2000 году, когда стали очевидными важность и огромное значение его работ для развития науки и техники.

Долгое время развитие светодиодов сдерживалось отсутствием приборов, излучающих в синем диапазоне. Попытки реализовать синие и зелёные светодиоды и лазеры были связаны с использованием кристаллов нитрида галлия GaN и селенида цинка ZnSe.

У светодиодов на основе SiC оказался слишком мал КПД и низок квантовый выход излучения (то есть число излучённых квантов на одну рекомбинировавшую пару). У светодиодов на основе твёрдых растворов селенида цинка ZnSe квантовый выход был выше, но они перегревались из-за большого сопротивления и служили недолго. Оставалась надежда на нитриды.

Исследования свойств нитридов элементов группы III (AlN, GaN, InN) и их сплавов, представляющих собой широкозонные полупроводники с прямыми оптическими переходами, позволили заключить, что они явля-

ются наиболее перспективными материалами для изготовления свето- и лазерных диодов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой (240...620 нм) областях спектра.

Основной причиной, препятствовавшей получению высококачественных пленок GaN, было отсутствие подходящих подложек, параметры решётки и коэффициент теплового расширения которых соответствовали бы GaN. Долгое время такие плёнки выращивали на сапфире (рассогласование решеток 13,5%), достоинствами которого являются лишь термическая стойкость и возможность очистки перед началом роста. Другая проблема – получение кристаллов р-типа. Первые работы в этом направлении были начаты ещё в 60-е годы XX века, однако все попытки надёжно внедрить элементы группы II (Mg, Zn, Be) как примеси замещения, которые бы действовали как акцепторы, завершились неудачей.

Ещё в 70-х годах группа Дж. Панкова (J. Pankove, RCA, Princetone, USA) из лаборатории компании IBM создала фиолетовые и голубые диоды на основе эпитаксиальных пленок нитрида галлия (GaN) на сапфировой подложке. Квантовый выход был достаточен для практики (доли процента), но срок их службы был ограничен. В р-области р-п-перехода концентрация дырок была мала, и сопротивление диодов из-за высокой концентрации дефектов оказалось слишком большим, они довольно быстро перегревались и выходили из строя. При этом Панкову так и не удалось осуществить легирование р-типа.

В начале 80-х годов Г.В. Сапарин и М.В. Чукичев в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова обнаружили, что после действия электронного пучка образец GaN, легированный Zn, становится ярким люминофором. Но причину яркого свечения – активацию акцепторов Zn под влиянием пучка электронов – тогда понять не удалось.

Эту причину раскрыл И. Акасаки (I. Akasaki) из Нагойского университета. Из многих его достижений выделим два основных, сделанных в 80-е годы XX века. Он предложил включить между сапфиром и активным слоем буферный слой AlN, что отчасти снимало проблему несоответствия решёток, и уже в 1986 году получил пленки GaN высокого качества. А в

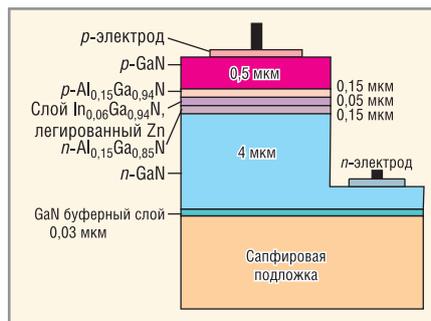


Рис. 1. Структура синего светодиода

1989 году счастливый случай помог ему вместе с его аспирантом Аmano (H. Amano) впервые изготовить образец р-типа. Изучая под электронным микроскопом легированную Mg плёнку GaN, Акасаки и Аmano обнаружили свечение образца после бомбардировки электронами. Завершив электронно-микроскопические исследования, они установили, что образец приобрёл проводимость р-типа, и связали это с воздействием электронного пучка на плёнку, способствовавшим замещению атомов Ga атомами Mg. Авторы заявили патент на эффективное легирование GaN р-типа. К тому времени большинство исследователей прекратили работать с GaN, и сообщение Акасаки почти не привлекло внимания. Но эти работы не оставил без внимания Шуджи Накамура (Shuji Nakamura) из фирмы Nichia Chemical, который и совершил прорыв в изготовлении голубых светодиодов.

Узнав о важном достижении Акасаки по получению материала р-типа, Накамура быстро воспроизвел этот результат, но при этом заметил, что облучение образца электронным потоком приводило к небольшому его нагреву, и предположил, что наблюдавшийся эффект мог быть просто результатом влияния температуры. Подвергнув образец отжигу в атмосфере азота, он обнаружил, что его сопротивление понизилось, и таким образом выяснил, что эффект был не следствием обработки пучком электронов, а результатом прогрева.

Свой первый синий светодиод Накамура изготовил 28 марта 1991 года. Он оставил диод включённым, когда уходил домой, а после бессонной ночи, придя рано утром в лабораторию, увидел, что диод ещё светит. И хотя излучение было не очень ярким, это была победа. Два с половиной года спустя после многочисленных улучшений Накамура изготовил диоды,

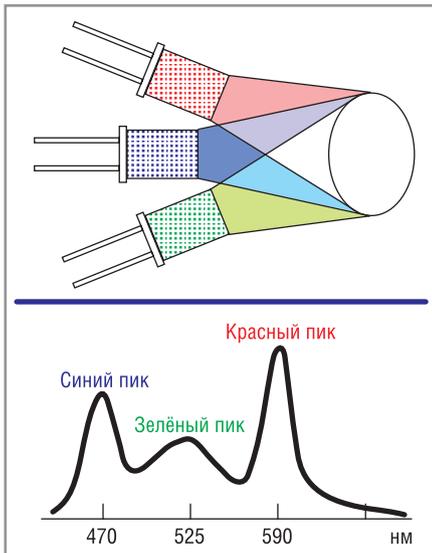
излучавшие с силой света 1000 мккд, а ещё через шесть месяцев компания объявила о выпуске 2000-мккд диода, который излучал настолько ярко, что на него больно было смотреть.

29 ноября 1993 года компания Nichia Chemical Industries объявила, что завершила разработку голубых светодиодов на основе GaN и планирует приступить к их массовому производству.

Первый коммерческий синий светодиод был сделан Накамурой в начале 1994 года на основе гетероструктуры InGaN/AlGaIn с активным слоем InGaN, легированным Zn (рис. 1). Выходная мощность составляла 3 мВт при прямом токе 20 мА с квантовым выходом 5,4% на длине волны излучения 450 нм. Вскоре после этого за счёт увеличения концентрации In в активном слое был изготовлен зелёный светодиод, излучавший с силой света 2 кд. Он состоит из 3-нм активного слоя InGaN, заключённого между слоями р-AlGaIn и n-GaN, выращенными на сапфире. Такой тонкий слой InGaN сводит к минимуму влияние рассогласования решёток: упругое напряжение в слое может быть снято без образования дислокаций и качество кристалла остаётся высоким. В 1995 году при ещё меньшей толщине слоя InGaN и более высоком содержании In удалось повысить силу света до 10 кд на длине волны 520 нм, а квантовую эффективность до 6,3%, причём измеренное время жизни светодиодов составляло 50 000 ч, а по теоретическим оценкам – более 10<sup>6</sup> ч (~150 лет!).

Накамура запатентовал ключевые этапы технологии, и к концу 1997 года фирма Nichia выпускала уже 10...20 млн. голубых и зелёных светодиодов в месяц. Дела компании стремительно понеслись вверх, доходы выросли с 20 млрд. иен в 1993 г. до 116 млрд. иен в 2002 и порядка до 180 млрд. иен в 2003.

На сегодняшний день внешний квантовый выход излучения светодиодов на основе GaN и его твёрдых растворов (InGaN, AlGaIn) достиг значений 29/15/12% соответственно для фиолетовых/голубых/зелёных светодиодов; их светоотдача достигла значений 30...50 лм/Вт. Внутренний квантовый выход для «хороших» кристаллов с мощным теплоотводом достигает почти 100%, рекорд внешнего квантового выхода для красных све-

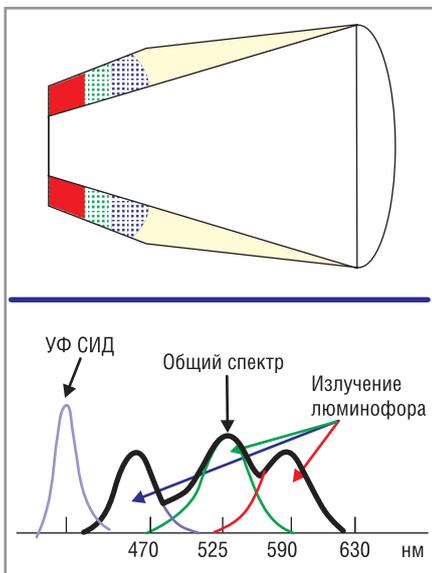


**Рис. 2.** Получение белого света путём смешивания излучения красного, зелёного и синего светодиодов

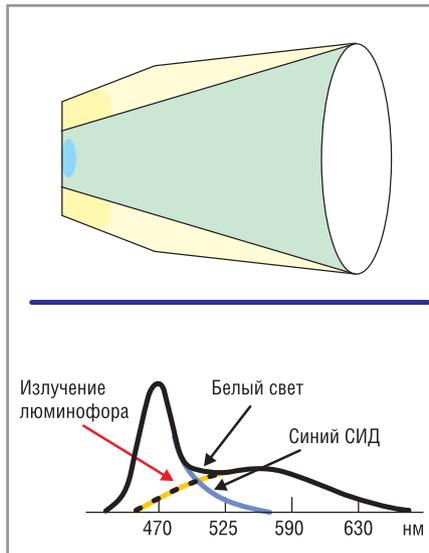
одиодов составляет 55%, а для синих 35%. Внешний квантовый выход излучения жёлтых и красных светодиодов на основе твёрдых растворов AlInGaP достиг значений 25...55%, а светоотдача соответственно достигла 100 лм/Вт, т.е. сравнялась со светоотдачей лучших современных люминесцентных ламп.

**Технологии создания белых светодиодов**

Изобретение синих светодиодов замкнуло «RGB-круг» и сделало возможным получение светодиодов белого свечения. Существует четыре способа создания белых СД, каждый со своими достоинствами и недостатками.



**Рис. 5.** Получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора

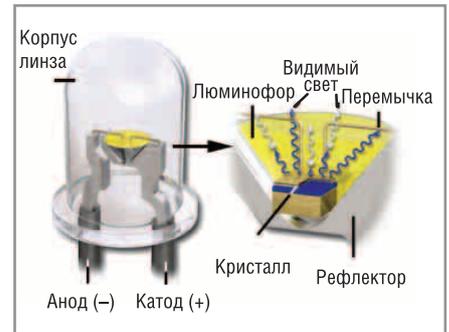


**Рис. 3.** Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора

Один из них – смешение излучения СД трёх или более цветов. На рис. 2 показано получение белого света путем смешивания в определённой пропорции излучения красного, зелёного и синего светодиодов. В принципе такой способ должен быть наиболее эффективным. Для каждого из СД – красного, зелёного или голубого – можно выбрать значения тока, соответствующие максимуму его внешнего квантового выхода излучения. Но при этих токах и напряжениях интенсивности каждого цвета не будут соответствовать значениям, необходимым для синтеза белого цвета. Этого можно достигнуть, изменяя число диодов каждого цвета и составляя источник из многих диодов. Для практических применений этот способ неудобен, поскольку нужно иметь несколько источников различного напряжения, много контактных вводов и устройства, смешивающие и фокусирующие свет от нескольких СД.

Второй и третий способы – смешение голубого излучения СД с излучением либо жёлто-зелёного люминофора, либо зелёного и красного люминофоров, возбуждаемых этим голубым излучением. На рис. 3 показано получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора.

Эти способы наиболее просты и в настоящее время наиболее экономичны. Состав кристалла с гетероструктурами на основе InGaN/GaN подбирается так, чтобы его спектр из-



**Рис. 4.** Строение 5-мм светодиода, излучающего белый свет

лучения соответствовал спектру возбуждения люминофоров. Кристалл покрывается слоем геля с порошком люминофора таким образом, чтобы часть голубого излучения возбуждала люминофор, а часть – проходила без поглощения. Форма держателя, толщина слоя геля и форма пластикового купола рассчитываются и подбираются так, чтобы излучение имело белый цвет в нужном телесном угле. Сейчас исследуется около десятка различных люминофоров для белых СД. На рис. 4 показано строение 5-мм светодиода, излучающего белый свет.

Четвертый способ – смешение излучения трёх люминофоров (красного, зелёного и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом. На рис. 5 показано получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора.

Этот способ использует технологии и материалы, которые разрабатывались в течение многих лет для люминесцентных ламп. Он требует только два контактных ввода на один излучатель. Но этот способ связан с принципиальными потерями энергии при преобразовании света от диода в люминофорах. Кроме того, эффективность источника излучения уменьшается, т.к. разные люминофоры имеют разные спектры возбуждения люминесценции, не точно соответствующие УФ-спектру излучения кристалла СД.

Светоотдача белых СД ниже, чем светоотдача СД с узким спектром, поскольку в них происходит двойное преобразование энергии, часть её теряется в люминофоре. В настоящее время светоотдача лучших белых СД 25...30 лм/Вт.

Физические принципы действия СД и возможности технических разработок дают основание для оптими-

стических прогнозов. Теоретический предел светоотдачи белых СД составляет около 300 лм/Вт.

## ПРОИЗВОДИТЕЛИ СВЕТОДИОДОВ

Когда технология светодиодов обеспечит их конкурентоспособность по сравнению с обычными лампами, придётся сворачивать ламповое производство. В предвидении этого в разработки и организацию производства СД вкладывают средства такие гиганты светотехнической промышленности (выпускающие лампы накаливания и люминесцентные лампы), как General Electric, Philips, Osram. Как заметил Макаранд Чипалкатти, менеджер по маркетингу из подразделения Opto Semiconductors компании Osram Sylvania, специализирующегося на устройствах LED, производители светотехники сами уничтожат свой бизнес. Но если сегодня не «наступить на горло собственной песне», то завтра придут другие и сделают это куда более жёстко.

Кто же производит сегодня светодиоды?

Как уже упоминалось выше, рынок светодиодов расценивается как исключительно важный всеми производителями электронных компонентов, включая «китов» светотехнической индустрии.

В течение последних 5 лет светодиодный рынок устойчиво развивается, достигая 60% прироста товарной массы. По оценкам аналитиков ожидается, что к 2005 году ежегодный объём рынка составит более \$3 млрд.

Чтобы изготавливать качественные светодиоды в нужном количестве, понадобилось слияние двух отраслей – электронной и светотехнической. Все западные гиганты, производящие светодиоды для светотехники по полному циклу, начиная с производства чипов и заканчивая различными светодиодными модулями и сборками, а также светильниками на их основе, идут по этому пути. Количество заключённых стратегических альянсов, а также возникновение новых компаний, особенно тайваньских, специализирующихся на выпуске светодиодов, явно рекордное в последние годы, косвенно свидетельствует о серьёзном движении капиталов.

General Electric заключила союз с производителем полупроводниковых приборов Emcore, создав компа-

нию GEL Core. Philips Lighting совместно с Agilent, дочерней компанией Hewlett-Packard, создали предприятие LumiLeds. Osram объединяет усилия с полупроводниковыми предприятиями своей материнской компании Siemens.

Впрочем, существуют компании, специализирующиеся только на производстве чипов. Это предприятия радиоэлектронной промышленности, и они не занимаются светотехникой. К их числу относится Nichia Chemical.

Итак, перечислим основных производителей.

*Nichia Chemical*, Япония (www.nichia.com). Компания, впервые разработавшая СД синего и белого свечения на основе структур InGaN, сохраняет лидирующие позиции в производстве сверхъярких синих, зелёных и белых светодиодов.

*Lumileds Lighting*, США (www.lumileds.com). Совместное предприятие Agilent Technologies и Philips Lighting. Производство сверхъярких светодиодов с повышенным током накачки, светодиодных сборок и модулей (Barracuda, Luxeon) очень высокой яркости. Lumileds Lighting является лидером в производстве сверхъярких мощных светодиодов всех цветов, включая белый. На данный момент Lumileds Lighting производит широкий ассортимент мощных светодиодов различной модификации под названием Luxeon и световых модулей на их базе.

*Agilent Technologies*, США (www.agilent.com). Отделение электронных компонентов компании Hewlett Packard, с 1999 г. – самостоятельная компания. Признанный лидер в разработке сверхъярких СД.

*Osram Optosemiconductors* (штаб-квартира компании находится в Германии, производственные мощности – в США и Малайзии) (www.osram-os.com). Бывшее совместное предприятие Osram и Infineon Technologies, которое сейчас полностью принадлежит Osram. Производство сверхъярких светодиодов, в том числе для поверхностного монтажа. Очень широкая линейка светодиодных модулей (линейные, гибкие, круглые и др.).

Чипы и отдельные светодиоды производят компании: Cree (www.cree.com), GEL Core (www.gelcore.com), Vishay Semiconductors (www.vishay.com). На российском рынке (и рынке СНГ) хорошо известны также такие тай-

ваньские производители: Kingbright Electronics (www.kingbright.com, www.kingbright-led.com), Ligitek Electronics (www.ligitek.com), Para Light Electronics Co. (www.para.com.tw).

Полный список фирм – производителей оптоэлектронных компонентов – можно посмотреть на сайте [http://www.itis.spb.ru/win/link\\_opt.htm](http://www.itis.spb.ru/win/link_opt.htm), а найти всех тайвано-китайских производителей можно на сайте [www.manufacturers.com.tw/search\\_keyword.php?st=1&sk=LED+lamp](http://www.manufacturers.com.tw/search_keyword.php?st=1&sk=LED+lamp).

Светодиоды, в том числе белого света, выпускаются и в России фирмами «Корвет-лайтс» (www.corvette-lights.ru), «Протон» (www.proton.orel.ru), «Транс-Лед» (www.transled.ru), НПЦ ОЭП ОПТЭЛ (www.optelcenter.com), «Оптоника» (www.optonica.ru), «Светлана Оптоэлектроника» (www.svetlana-o.spb.ru).

По конструкции и технологическому исполнению наши светодиоды не уступают зарубежным, перечисленные компании имеют соответствующие патенты. В Москве и Санкт-Петербурге есть возможность выращивать собственные чипы – например, эпитаксиальная установка имеется в Санкт-Петербургском физтехе, – но для промышленного производства необходимо крупное финансирование, и пока наши компании используют зарубежные чипы.

Несколько слов об отличии основных показателей качества белых светодиодов – дешёвых и более дорогих, как правило, высококачественных, поставляемых на светодиодный рынок российскими и зарубежными компаниями – Nichia, Lumileds и др.

Обычно более дешёвым светодиодам присущи следующие особенности. В течение первых 4000 часов работы даже в нормальных климатических условиях происходит падение яркости на 35% из-за пожелтения светодиодной колбы из эпоксидного материала, потемнения металлического покрытия лунки отражателя, в которую помещён светодиодный чип, а также деградации излучательной способности как синего светодиодного чипа, так и нанесённого слоя люминофора. В качественных приборах эти проблемы сведены к минимуму и деградация яркости светодиода за 50 000 часов не превышает 20%.

Недобросовестные изготовители из Юго-Восточной Азии часто пользуются отсутствием у потребителя

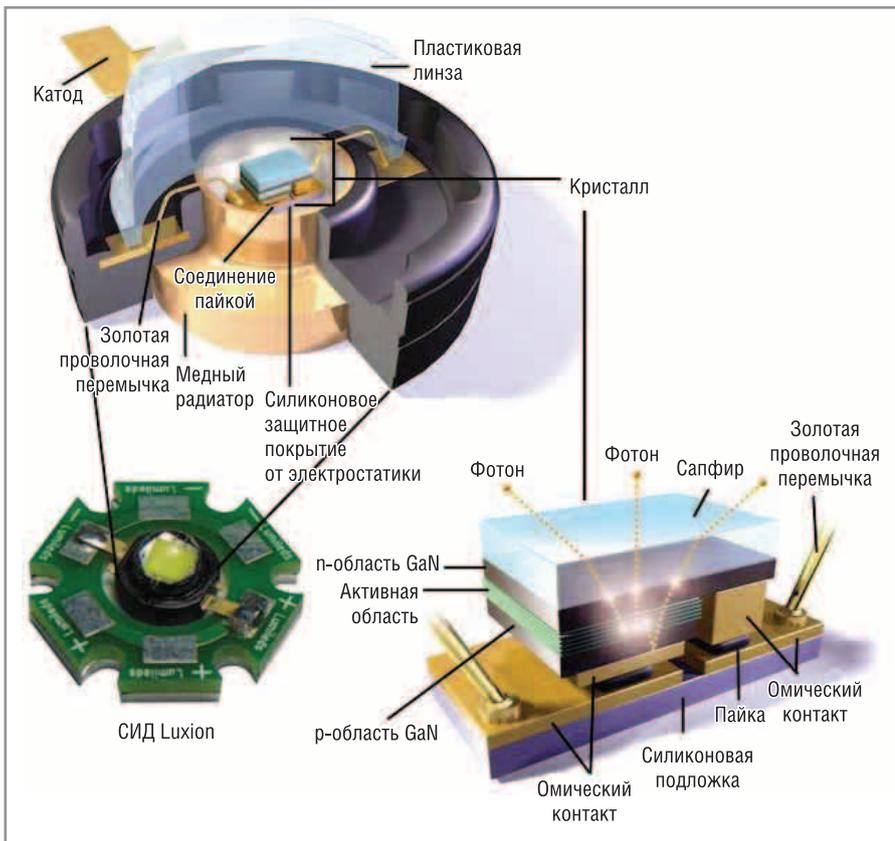


Рис. 6. Строение светодиода Luxeon III

средств измерений (кроме их собственных глаз), предлагая «слабую» группу вместо «сильной» по демпинговой цене. Так рождаются легенды о низких ценах. На самом деле цена соответствует качеству и действительным параметрам.

### Конструкции мощных светодиодов

Рассмотрим более подробно мощные высокоэффективные светодиоды белого света известных производителей. Конструкции мощных светодиодов основаны на следующих принципах:

- использованы высокоэффективные излучающие гетероструктуры в системах AlGaInP/GaAs, AlGaInP/GaP и InGaN (активная область гетероструктуры содержит либо одиночную, либо множественные квантовые ямы);
- излучающие кристаллы имеют площадь не менее 1 мм<sup>2</sup> (вместо 0,05 мм<sup>2</sup> в стандартных СИД диаметром 5 мм); увеличение площади кристалла направлено на увеличение рабочего тока, т.е. на увеличение светового потока и снижение теплового сопротивления кристалла;
- для увеличения светового потока в ряде конструкций применяются

несколько кристаллов, соединённых как последовательно, так и параллельно-последовательно;

- в качестве кристаллодержателя для улучшения теплоотвода использованы мощные медные основания (радиаторы);
- для сбора и преобразования бокового излучения кристаллов применены соответствующие рефлекторы;
- для эффективного вывода излучения и формирования заданной диаграммы направленности излучения конструкции светодиодов содержат полимерную линзу, согласованную по размерам с отражателем бокового излучения, а также в некоторых конструкциях вторичную оптику.

На рис. 6 показано строение светодиода Luxeon III мощностью 3 Вт. Конструкция светодиода Luxeon обеспечивает эффективный отвод тепла от кристалла. Световая отдача белого светодиода Luxeon III при номинальном прямом токе 0,7 А составляет 25 лм/Вт, световой поток при этом равен 65 лм.

Светоотдача Luxeon III уже превосходит светоотдачу классических и галогенных ламп накаливания, и в ближайшее время Lumileds Lighting пла-



Рис. 7. Внешний вид белого светодиода Luxeon Star



Рис. 8. Излучатель Luxeon Side Emitting на основании Star

нирует вплотную подойти к выпуску люминесцентных ламп со светоотдачей 80...100 лм/Вт.

Светодиоды Luxeon делятся по электрической мощности на следующие серии:

- Luxeon – однокристалльные с прямым рабочим током 350 мА, мощность 1 Вт,
- Luxeon III – однокристалльные с прямым рабочим током 0,7...1 А, мощность 3 Вт,
- Luxeon V – четырёхкристалльные с прямым рабочим током 700 мА, мощность 5 Вт.

Варианты исполнения:

- Emitter – базовый элемент, единственный светодиод;
- Star – Emitter на теплоотводящем основании;
- Star/C – Emitter на квадратном теплоотводящем основании с разъемом;
- Star/O – Emitter с интегрированной вторичной оптикой;
- Star/IDC – Emitter на ромбовидном теплоотводящем основании.

На рис. 7 показан внешний вид белого светодиода Luxeon Star. Хорошо видно, что кристалл и рефлектор покрыты слоем жёлтого люминофора. На рис. 8 показан Luxeon Side Emitting на основании Star. Благода-



Рис. 9. Излучатели (слева направо): Luxeon Star/O с интегрированной вторичной оптикой, Luxeon Star и Luxeon Emitter

ря специальной конической линзе он имеет круговую диаграмму излучения. На рис. 9 показаны (слева направо) Luxeon Star/O с интегрированной вторичной оптикой, Luxeon Star и Luxeon Emitter.

Модуль Line представляет собой двенадцать светодиодов Star/O, закреплённых на основании в виде линейки (рис. 10). Модули Ring 6 и Ring 12 состоят соответственно из шести и двенадцати светодиодов Star/O, закреплённых на кольцевом основании (рис. 11). Модули Flood 12, Flood 18 – источники света, состоящие из 12 или 18 светодиодов, закреплённых на квадратном основании (рис. 12). Источники света DCC состоят из 11...40 светодиодов, закреплённых в ряд на основании в виде линейки. В одном устройстве находятся



Рис. 10. Модуль Line



Рис. 11. Модули Ring 6 и Ring 12

раздельно управляемые группы светодиодов красного, зелёного и синего цветов, что позволяет динамически изменять цвет в рамках цветового пространства RGB. Источники света этого типа предназначены для динамической подсветки, а также в качестве источников света для подсветки жидкокристаллических дисплеев. В таблице 1 приведены технические характеристики светодиодов белого света Luxeon.

Помимо Lumileds Lighting высокоэффективные мощные светодиоды выпускают и другие известные фирмы производители: Osram Optose-



Рис. 12. Модули Flood 12 и Flood 18



Рис. 13. Внешний вид светодиода Golden Dragon



Рис. 14. Внешний вид светодиода Сила 3

miconductors выпускает серию Golden Dragon (рис. 13), Nichia выпускает серию Jupiter, АО «Протон» выпускает серию светодиодов СИЛА (рис. 14). В таблице 2 приведены технические характеристики мощных светодиодов белого света Osram, Nichia, «Протон». В таблице 3

Таблица 1. Технические характеристики светодиодов белого света Luxeon

Тип изделия	Исполнение	Световой поток, лм	Прямой ток номинальный, мА	Прямое напряжение номинальное, В	Угол излучения, градус	Цветовая температура излучения ССТ (номинальная), К
Luxeon						
LXHL-BW01 LXHL-PW01 LXHL-DW01		22...25	350	3,42	110	5500
Luxeon™ Warm White LXHL-BW03 LXHL-MWGC LXHL-NWGC8		20	350	3,42	110	3300
LXHL-BW02 LXHL-MWEC LXHL-MW1D LXHL-MWEA LXHL-NWE8		25	350	3,42	110	5500
Luxeon III						
LXHL-PW09	Emitter	65	0,7	3,7	140	5500
		80	1	3,9		
LXHL-LW3C	Star	80	1	3,9	140	5500
		65	0,7	3,7		
Luxeon V Portable						
LXHL-FW6C	Star Side Emitting	110	0,7	6,84	85	5500
LXHL-DW03	Emitter Side Emitting	110	0,7	6,84	85	5500
LXHL-PW03	Emitter Lambertian	120	0,7	6,84	120	5500
LXHL-LW6C	Star Lambertian	120	0,7	6,84	120	5500

Таблица 2. Технические характеристики мощных светодиодов белого света Osram, Nichia, «Протон»

Тип изделия	Световой поток, лм	Прямой ток номинальный, мА	Прямое напряжение номинальное, В	Угол излучения, градус	Производитель
Golden DRAGON™ LWW5SG	25	350	3,8	120	Osram Optosemiconductors
NICHIA JUPITER™ NCCW022	23	350	3,8	70	Nichia
NCCW023	23	350	3,8	35	
Сила 3 1П48	23	350	3,5	120	«Протон»
Сила 2 1П47	40	500	10,5	120	

Таблица 3. Технические характеристики стандартных 5-мм светодиодов белого света различных производителей

Тип изделия	Прямое напряжение номинальное, В	Сила света, при I <sub>np</sub> = 20 мА, мКд	Угол излучения, градус	Производитель
L-513NWC-30D	3,5	3500...5900	30	Para Light Electronics
L-513LWC	3,5	5000	15	
L-5T3VW5C-D1	3,5	8500	18	
L-5T3VW5C-D2	3,5	7500	25	Nichia
NSPL500S	3,6	1800	50	
NSPL510S NSPW510BS	3,6	1800	50	
NEPW500BS	3,6	6400	20	
NSPW515BS	3,6	480	70	
W7114PWC/H	3,7	4000	20	Kingbright Electronics
L-7083PWW-H	3,7	1000	60	
LWK3333-3	3,5	1500	30	Ligitek Electronics
LWK3333-30	3,5	1500	30	
LWK3333	3,5	3000	16	
LWK3833	3,5	4000	12	
TLCW5100	3,9	4000 при I <sub>np</sub> = 30 мА	18	Vishay Semiconductors
LC503PWH1-15G	3,6	5000	15	Cotco
КИПД80Б КИПД80Т-1Б	3,7	3000	23	«Протон»
КИПД 21 СЗ-Б	3,5	4000	20	«ТрансЛед»
10 мм У164-Бл	3,7	При I <sub>np</sub> = 30 мА, 35 кд, 22 лм/Вт	8	ОПТЭЛ

приведены технические характеристики стандартных 5-мм светодиодов белого света различных производителей.

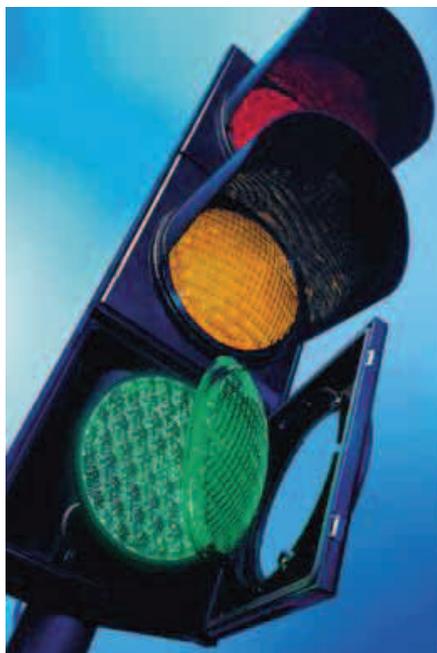


Рис. 15. Светодиодный светофор

### Сегодняшний день и перспективы полупроводниковых источников света

Преимущества светодиодов, кроме высокой световой отдачи, малого энергопотребления и возможности получения любого цвета излучения, заключаются в целом ряде других замечательных свойств.

Отсутствие нити накала благодаря нетепловой природе излучения светодиодов обуславливает длительный срок службы. Производители светодиодов декларируют срок службы до 100 000 часов. Напомню, что у ламп накаливания средний срок службы составляет 1000 часов, у люминесцентных в большинстве случаев срок службы ограничивается 10...15 000 ч. Отсутствие стеклянной колбы у светодиодов определяет очень высокую механическую прочность и надежность.

Малое тепловыделение и низкое питающее напряжение гарантируют



Рис. 16. Фонтан «Похищение Европы» на набережной Москва-реки напротив Киевского вокзала, подсвеченный 960 светодиодными излучателями

высокий уровень безопасности, а безынерционность делает светодиоды незаменимыми, когда нужно высокое быстродействие. Сверхминиатюрность и встроенное светораспределение определяют другие, не менее важные достоинства. Световые приборы на основе светодиодов оказываются компактными и удобными в установке.

Не следует забывать об экологичности светодиодов (отсутствии у них ртутьсодержащих компонентов по сравнению с люминесцентными лампами), а также отсутствии электромагнитных излучений и помех, что крайне важно в современных условиях ужесточения экологических норм.

Единственный недостаток светодиодов на сегодняшний день – их цена. Пока что один люмен, излученный светодиодом, стоит в 100 раз выше, чем галогенная лампа.

Во всех устройствах, требующих передачи информации знаками определенного цвета: автодорожных и железнодорожных светофорах (рис. 15), панелях управления в автомобилях и самолетах, задних огнях автотранспорта, дорожных световых табло, фонарях аэродромных полос, цветовые характеристики светодиодов имеют существенные преимущества перед обычными лампами. Они не требуют цветных светофильтров; они лучше различимы глазом, поскольку близки к монохроматическим источникам света. Как источники «цветного» света светодиоды давно обогнали лампы накаливания со светофильтрами. Так, световая отдача лампы накаливания с красным светофильтром составляет всего 3 лм/Вт, в то время как красные светодиоды сегодня дают 50 лм/Вт и более.

Особенно эффектно применение светодиодов для цветной подсветки архитектурных деталей и сооружений. На рис. 16 показан фонтан на

Таблица 4. Этапы развития полупроводниковых источников света по проекту американской программы освещения будущего

Характеристика источников света	Светодиодный источник 2002 г.	Светодиодный источник 2007 г.	Светодиодный источник 2012 г.	Светодиодный источник 2020 г.	Лампа накаливания	Люминесцентная лампа
Световая отдача, лм/Вт	25	75	150	200	16	85
Срок службы, тыс. ч	20	>20	>100	>100	1	10
Световой поток, лм/лампу	25	200	1000	1500	1200	3400
Входная мощность, Вт/ лампу	1	2,7	6,7	7,5	75	40
Стоимость 1 лм, \$	200	20	<5	<2	0,4	1,5
Стоимость 1 лампы, \$	5	4	<5	<3	0,5	5
Индекс цветопередачи, Ra	75	80	>80	>80	95	75
Выход на рынок и конкурентоспособность	Слабое освещение	Замена ламп накаливания	Замена люминесцентных ламп	Все применения		

площади Европы возле Киевского вокзала в Москве, подсвеченный 960 светодиодами светильниками, изменяющими свой цвет в ансамбле с музыкальным сопровождением изменения струй в фонтане.

Создание и разработка твердотельных светодиодных источников света является одной из самых горячих тем благодаря многочисленному и важному практическому применению, поэтому в эту область вкладываются огромные средства. Финансовый объём производства светодиодов достиг в 2002 г. \$500 млн. и, по прогнозам, превысит \$4 миллиарда в 2007 г.

В 1998 г. одиннадцать крупнейших японских компаний разработали программу «Свет в XXI веке» с финансированием на 4 года, но планированием задач до 2010 г. Эта программа поставила цель замены традиционных ламп накаливания и люминесцентных ламп светильниками нового типа на основе светодиодов белого свечения. Двухлетний отчет по этой программе был частично переведён на английский язык и опубликован в Интернете (<http://lighting.sandia.gov>) сотрудниками Национальной Лаборатории Sandia (США).

После этого была разработана американская программа создания твердотельного освещения Next Generation Lighting Initiative (<http://lighting.sandia.gov>) с перспективами развития до 2020 г. Программа предусматривает финансирование исследований, разработок и производства светодиодных источников света в размере \$50 млн. ежегодно вплоть до 2011 г. Авторы программы сравнивают её значение для Соединенных Штатов с программой ядерных исследований в 40-е годы (проект «Манхэттен»).

В таблице 4 показаны планируемые американской программой вехи развития источников света. Пред-

полагается, что в 2007 г. эффективность, срок службы и экономичность светодиодов будут достаточны для постепенной замены ламп накаливания, а в 2012 г. – для замены люминесцентных ламп. Экономия электроэнергии, расходуемой на освещение за предстоящие 20 лет, будет эквивалентна финансовой экономии в размерах от 60 до 120 млрд. долларов в зависимости от развития конкуренции с люминесцентными лампами.

Около 20% всей электроэнергии в мире расходуется на освещение: проблема энергосбережения – одна из важнейших проблем, связанная и с экономикой, и с охраной окружающей среды. Если будут осуществлены все прогнозы, связанные с исследованиями и разработками белых светодиодов, то расходы на электроэнергию для освещения уменьшатся приблизительно в два раза.

Судя по всему, в ближайшее время мы будем свидетелями неожиданных открытий и появления новых удивительных оптоэлектронных приборов и устройств.

## ГЛОССАРИЙ

**Квантовый выход** – число излучённых квантов света на одну рекомбинирующую электронно-дырочную пару. Различают внутренний и внешний квантовый выход. Внутренний – в самом p-n-переходе, внешний – для прибора в целом.

**Световой поток** – величина, характеризующая количество излучаемого света. Световой поток представляет собой мощность излучения, оцененную с позиции его воздействия на зрительный аппарат человека. Единица светового потока – люмен (лм).

**Светоотдача** – световой поток на единицу потребляемой мощности (лм/Вт). Этот параметр показы-

вает, сколько энергии, поступающей на светодиод, превращается в свет.

**Сила света** светодиода представляет собой величину светового потока, излучаемого вдоль выбранного направления в пространстве. Как правило, сила света излучателя зависит от направления излучения. Единица силы света – кандела (кд).

**Яркость** характеризует количество света, излучаемого в данном направлении, в отношении к площади излучающей поверхности. Яркость измеряется в канделах на квадратный метр (кд/м<sup>2</sup>).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лосев О.В. У истоков полупроводниковой техники: Изб. тр. Л., 1972.
2. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М., 1983.
3. Коган Л.М. Светодиодные осветительные приборы. Светотехника. 2002. № 5. С. 16...20.
4. Алфёров Ж.И. Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. № 1. С. 3...18.
5. Алфёров Ж.И. Физика и Жизнь. СПб., 2000.
6. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diode; GaN based Light Emitters and Lasers. Heidelberg, 1997.
7. Юнович А.Э. Свет из гетеропереходов. Природа. 2001. № 6. С. 38...46.
8. Юнович А.Э. Ключ к синему лучу, или о светодиодах и лазерах, голубых и зелёных. Химия и жизнь. 1999. № 5...6. С. 46...48.
9. Light Emitting Diodes for General Illumination. Tutorial Materials. Ed. J.I. Tsao. OIDA, 2002; <http://lighting.sandia.gov>.
10. [lighting.sandia.gov](http://lighting.sandia.gov).
11. [www.luxeon.com](http://www.luxeon.com).
12. [www.lumileds.com](http://www.lumileds.com).
13. [www.corvette-lights.ru](http://www.corvette-lights.ru).
14. [www.proton.orel.ru](http://www.proton.orel.ru).
15. [www.osram-os.com](http://www.osram-os.com).
16. [www.nichia.com](http://www.nichia.com).



# Применение аналоговых перемножителей сигналов для демодуляции сигналов ЧМ и узкополосной ЧТ

Юрий Ежков (г. Омск)

Для демодуляции узкополосных ЧМ- и ЧТ-сигналов автор предлагает использовать аналоговые перемножители в сочетании с кварцевыми резонаторами. Достоинствами схемы являются высокая крутизна преобразования и стабильность параметров при малой мощности потребления.

Для построения демодуляторов сигналов ЧМ и ЧТ возможно применение микросхем на основе аналоговых перемножителей сигналов (АПС), схемы которых достаточно хорошо известны [1...3]. Использование кварцевых резонаторов (КР) для формирования необходимых частотно-фазовых характеристик в таких демодуляторах позволяет расширить область применения АПС.

В переносных и портативных средствах радиосвязи задача снижения потребляемой мощности зачастую одновременно требует схемотехнических решений, содержащих минимум элементов и обеспечивающих малое потребление мощности. В приёмных устройствах традиционно применяется преобразование частоты, позволяющее обеспечивать основное необходимое усиление на сравнительно низкой промежуточной частоте (ПЧ).

Традиционно для фильтрации по соседнему каналу в тракте последней (и возможно, единственной) ПЧ применяется узкополосный (кварцевый или электромеханический) фильтр с полосой пропускания, которая немного шире спектра пропускаемого сигнала – на величину суммарной нестабильности частот передающего и приёмного

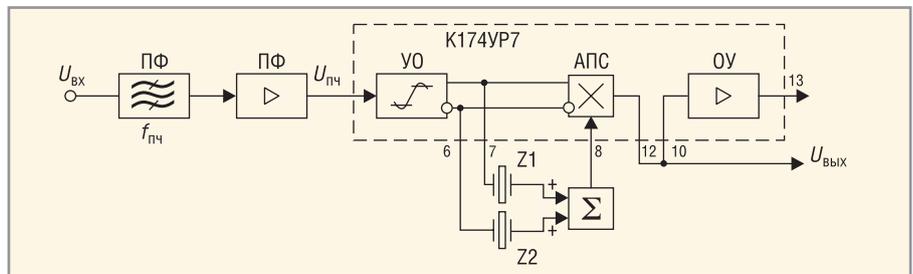


Рис. 1. Структурная схема тракта демодулятора сигналов F1B с малой девиацией частоты

ПФ – полосовой фильтр; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; УО – усилитель-ограничитель; АПС – аналоговый перемножитель сигналов; ОУ – операционный усилитель

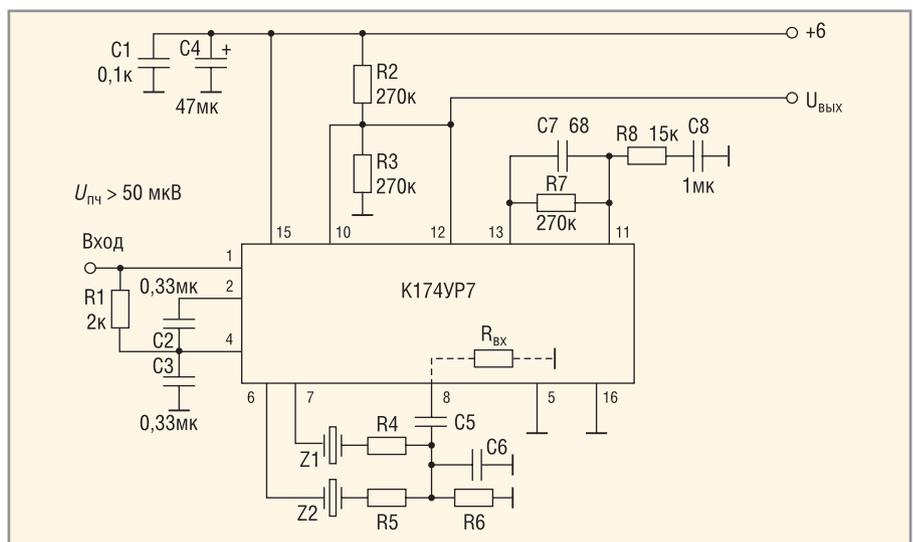


Рис. 2. Принципиальная схема демодулятора сигналов F1B с малой девиацией частоты

устройств (рис. 1). На выходе тракта ПЧ включается демодулятор соответствующего сигнала. В данном случае по приведённой структурной схеме может быть реализован тракт демодулятора сигналов узкополосной ЧТ (F1B) 50ЧТ-125, 5ЧТ-20 (скорость телеграфии  $B = 50$  и 5 Бод, разнос частот нажатия-отжата  $f_1 - f_0 = 2\Delta f = 125$  и 20 Гц соответственно). В профессиональных радиоприёмниках одно из стандартных значений ПЧ  $f_{ПЧ} = 128$  кГц. Для работы на этой частоте и выше, вплоть до 250 кГц, эффективно использование ИМС K174УР7, содер-

жащей в своём составе усилитель-ограничитель УО, аналоговый перемножитель сигналов АПС и операционный усилитель ОУ [1, 2]. В целом представленная структура позволяет построить демодулятор сигналов ЧТ (рис. 2) с высокой крутизной детекторной характеристики (рис. 3...5), которая является результатом амплитудно-фазового преобразования частотной модуляции за счет АПС и КР с резонансными частотами  $f_{ПЧ} - \Delta f, f_{ПЧ} + \Delta f$ . Симметричность детекторной характеристики в полосе  $[f_{ПЧ} - \Delta f, f_{ПЧ} + \Delta f]$  будет зависеть от идентичности фа-

зовых характеристик цепей, состоящих из соответствующих КР и входных сопротивлений следующих за ними элементов сумматора; наиболее важное условие – равенство их добротностей ( $Q_1 = Q_2$ ).

Линейность детекторной характеристики в некоторых пределах можно регулировать (см. рис. 4) при помощи элементов коррекции (резисторы R4...R6 на схеме рис. 2). Фазосдвигающие интегрирующие или дифференцирующие цепи C5, C6, R6, R<sub>ВХ</sub> позволяют корректировать положение характеристики на частотной оси (см. рис. 4). В области условного нуля ( $U_{\text{ВЫХ}} = 3,5$  В) линеаризация детекторной характеристики необходима в случае демодуляции сигналов ЧТ с девиацией, значительно меньшей  $\Delta f$  (например, в неперестраиваемом демодуляторе сигналов ЧТ с различной девиацией). При этом в области нуля крутизна повышается, однако максимальная амплитуда выходного сигнала может снижаться. Отметим, что спектр демодулируемых сигналов попадает в полосу пропускания схемы КР-АПС, поскольку за пределами линейного участка её селективные свойства не определяются добротностью КР. Аналогичные результаты (см. рис. 5) были получены при демодуляции сигналов 5ЧТ-20 и соответствующих резонансных частотах кварцевых резонаторов  $f_H = 127\,990$  Гц,  $f_B = 128\,010$  Гц; при этом крутизна детекторной характеристики такого демодулятора достигает 0,2 В/Гц. В режиме демодуляции 5ЧТ-20 возникают проблемы, вызванные недостаточной термостабильностью характеристик КР и возрастающими требованиями к стабильности генераторов опорных частот на приёмной и передающей сторонах.

Остальные параметры определяются паспортными данными ИМС К174УР7: для нормальной работы схемы входное напряжение  $U_{\text{ПЧ}}$  должно превышать 50 мкВ; ток, потребляемый собственно демодулятором, не более 0,8 мА. Элементы R1...R3, R7, R8, C1...C4, C7, C8 определены типовой схемой включения [1, 2]. Зарубежным аналогом российской микросхемы К174УР7 является ТСА770.

Помехоустойчивость демодулятора близка к потенциально возмож-

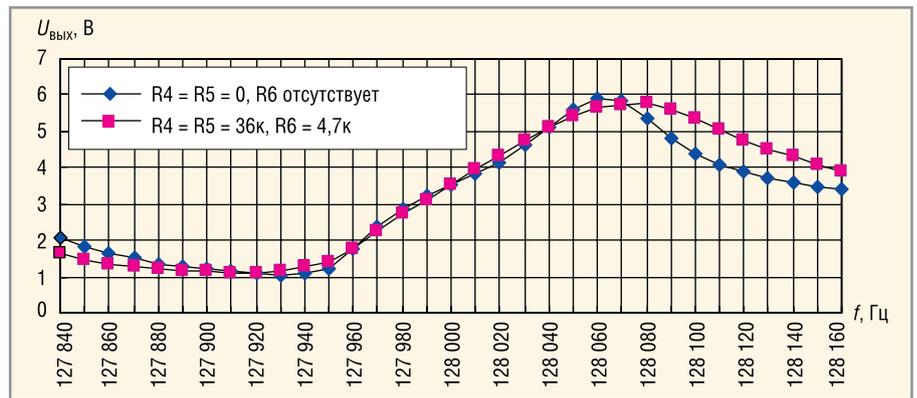


Рис. 3. Детекторная характеристика для демодуляции сигналов ЧТ

$B = 50$  Бод,  $f_1 - f_0 = 125$  Гц,  $f_0 = f_H = 127\,920 \pm 4$  Гц,  $f_1 = f_B = 128\,035 \pm 4$  Гц

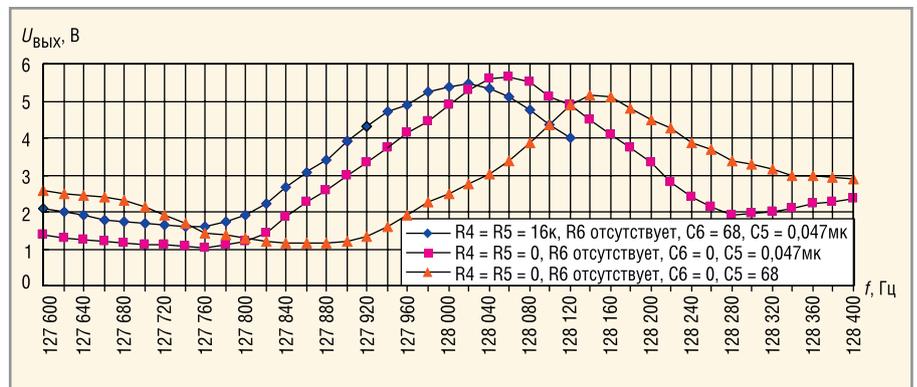


Рис. 4. Возможности изменения детекторной характеристики при неизменных кварцевых резонаторах

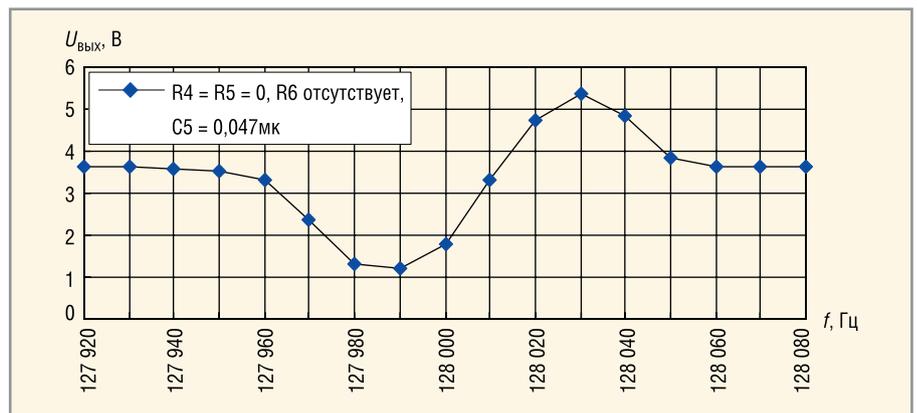


Рис. 5. Детекторная характеристика для демодуляции сигналов ЧТ

$B \leq 10$  Бод,  $f_0 = f_H = 127\,990$  Гц,  $f_1 = f_B = 128\,025$  Гц

ной при некогерентном приёме для схем с расфилтровкой, проанализированной в книге [4].

Возможно построение аналогичных устройств на основе отдельных ИМС АПС и ОУ, а также других ИМС на их основе. Следует учесть, что на других центральных частотах могут быть реализованы демодуляторы аналоговой ЧМ. При этом значение центральной частоты, резонансные частоты КР, крутизна и линейность детекторной характеристики оказываются взаимозависимыми параметрами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Микросхемы для бытовой радио-аппаратуры: Справочник. Под ред. И.В. Новаченко, В.М. Петухова, И.П. Блудова, А.В. Юровского. М.: Радио и связь, 1989.
2. Атаев Д.И., Болотников В.А. Аналоговые интегральные микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: Справочник. М.: Изд. МЭИ, 1991. С. 129...130.
3. Радиоприемные устройства. Под ред. Л.Г. Барулина. М.: Радио и связь, 1984.
4. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. 2-е изд. М.: Сов. радио, 1970.



# «Первый шаг» шагового двигателя

Олег Пушкарёв (г. Омск)

Шаговый двигатель является традиционным исполнительным устройством многих электронных приборов и систем. Автор не только знакомит нас с устройством и принципами работы шагового двигателя, но и предлагает несложное устройство, состоящее из PIC-процессора и драйвера, которое реализует различные режимы его работы.

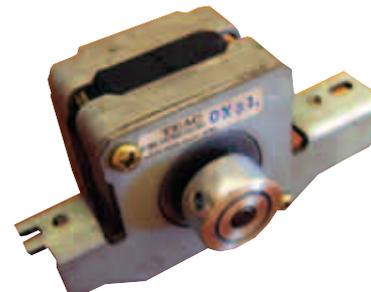


Рис. 1. Внешний вид шагового двигателя

Шаговый двигатель (далее ШД) представляет собой бесколлекторный двигатель постоянного тока с фиксированными положениями вала. ШД предназначен в первую очередь для точного позиционирования вала без применения систем обратной связи. ШД широко применяются в автомобилях, бытовой радиоаппаратуре, компьютерах. На производстве основное место использования ШД – это автоматизированное технологическое оборудование.

Для получения общего представления о теории ШД и проверки этой теории на практике достаточно небольшого объёма информации – в пределах этой статьи. Однако, как и в любой предметной области, знаний для профессионального освоения предмета требуется намного больше. С подробной теорией работы ШД можно ознакомиться по

ссылкам, приведённым в конце статьи.

Шаговый двигатель, в общем случае, – это двигатель, имеющий ротор, статор и несколько обмоток. Вал ШД совершает поворот на фиксированный угол (шаг) при кратковременной подаче напряжения на обмотки в правильной последовательности. Обычно обмоток 2 или 4. Для того чтобы заставить ШД вращаться, необходимо поочерёдно подавать рабочее напряжение на обмотки двигателя в нужной полярности. Для ШД с двумя обмотками (биполярного ШД) необходимо менять очередность и полярность подаваемых импульсов. ШД с 4 обмотками (униполярный ШД) проще в управлении – для вращения вала достаточно поочерёдно подавать напряжение на каждую из четырёх обмоток. Вал двигателя при этом будет каждый раз поворачивать-

ся на фиксированный шаг. Величина этого шага обусловлена конструкцией двигателя и составляет обычно единицы градусов. Как правило, чем меньше шаг двигателя, тем он дороже. Для формирования требуемой последовательности импульсов применяются микроконтроллеры в связке с силовыми элементами – драйверами. В простейшем случае драйвер представляет собой транзисторный ключ. Также выпускаются специализированные драйверы в интегральном исполнении, рассчитанные на разную мощность и более сложные алгоритмы управления, например, с использованием обратной связи.

Для нашего примера используем ШД привода головки записи-чтения от 5,25" флоппи-дисков TEAC (рис. 1).

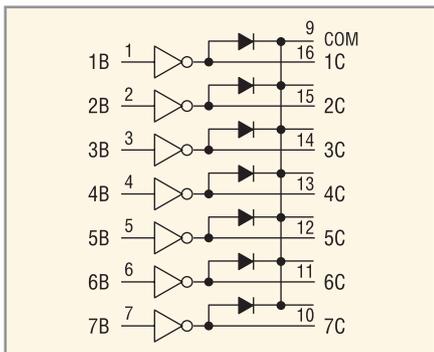


Рис. 2. Схема драйвера ULN2003A

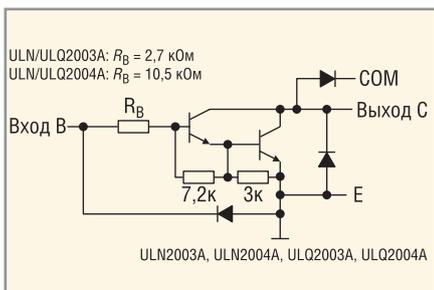


Рис. 3. Драйвер ULN2003A, схема одного канала

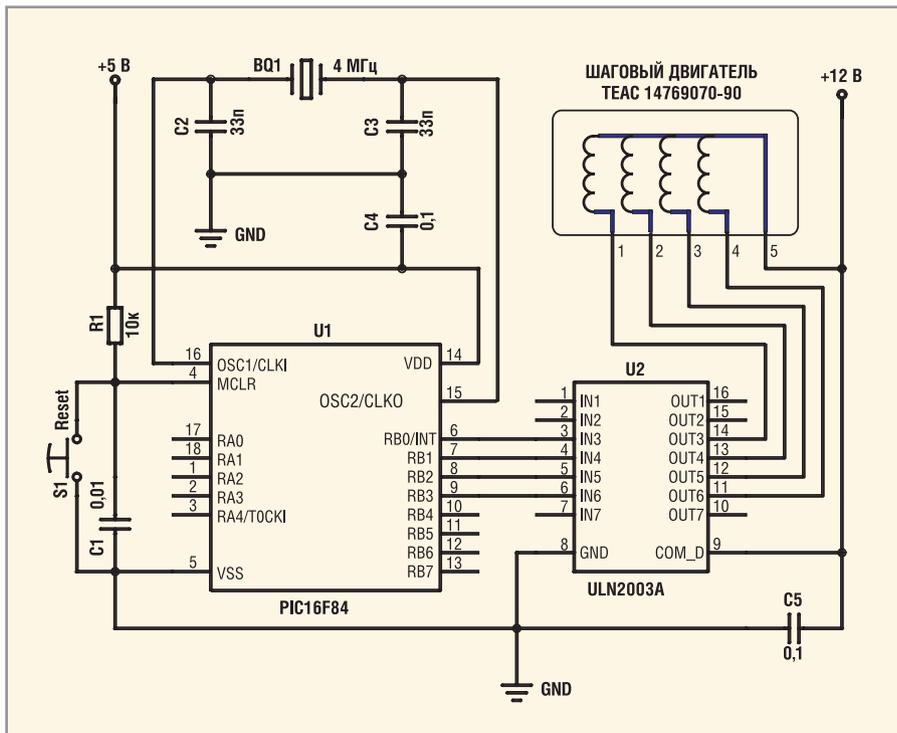


Рис. 4. Принципиальная схема устройства управления двигателем

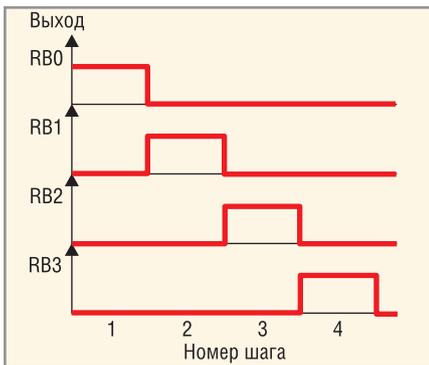


Рис. 5. Диаграмма подачи импульсов на обмотки в полношаговом режиме

Это униполярный двигатель с 5 выводами: 4 обмотки и общий провод подачи питания 12 В. ШД имеет шаг 1,8 градуса. Соответственно, для того чтобы вал совершил полный оборот, необходимо подать 200 импульсов. Для нашего эксперимента не подойдет ШД от современного 3,5" дисководов. Там применяются биполярные двигатели, которые требуют более сложной схемы драйвера. Кроме того, качество исполнения ШД от трёхдюймового дисководов заметно ниже. Для небольших униполярных двигателей от CD-привода, принтера или флоппи-дисководов в качестве драйвера можно применить микросхему ULN2003A (рис. 2). Это набор транзисторов по схеме Дарлингтона с открытым коллектором и защитным диодом в цепи нагрузки (рис. 3). Микросхема содержит в себе 7 каналов коммутации с током нагрузки до 0,5 А. В качестве микроконтроллера может использоваться любой 8- или 16-разрядный процессор. В экспериментальной схеме (рис. 4) мы применяем процессор PIC16F84 от Microchip, однако провести эксперимент с использованием данной программы можно практически на любом процессоре семейства PIC12...PIC18.

Программа 1 (Stepper1.asm) реализует вращение вала двигателя с заданной скоростью в одном направлении. Используется так называемый «полношаговый режим». Диаграмма подачи импульсов на обмотки приведена на рис. 5.

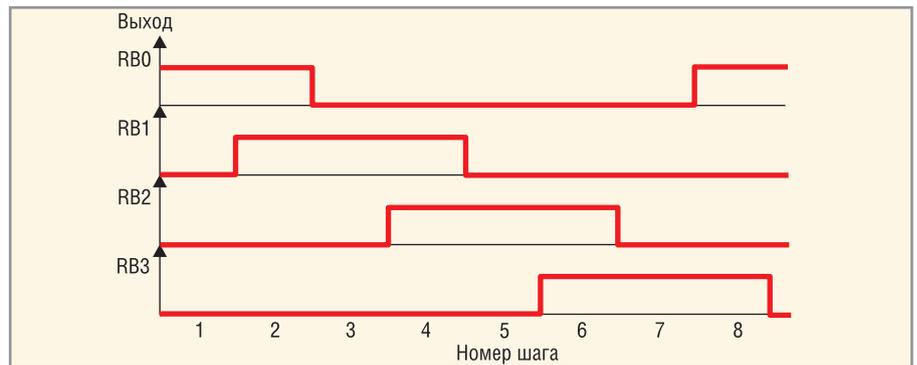


Рис. 6. Диаграмма подачи импульсов на обмотки в полушаговом режиме

Это простейший способ управления ШД со всеми присущими ему недостатками: повышенная шумность, колебания вала при перемещении от шага к шагу, особенно заметные при наличии массивной нагрузки на валу, малое количество шагов на оборот. В реальных системах используются более сложные алгоритмы управления ШД. Это режимы плавного разгона, микрошага, использование обратной связи по току и другие. В программе 2 (Stepper2.asm) реализован «полушаговый» режим управления. Здесь двигатель совершает в два раза больше шагов на оборот, т.е. теперь вал занимает и промежуточные положения между фиксированными углами поворота в 1,8 градуса. Это достигается одновременной подачей напряжения на две соседние обмотки на чётных шагах (рис. 6).

Полушаговый режим повышает плавность хода и снижает шум двигателя. Всего программой подаётся 200 импульсов на обмотки двигателя, при этом вал поворачивается на угол 180 градусов. Затем следует пауза в 2 секунды и происходит поворот на тот же угол, но в противоположном направлении. Далее цикл повторяется. Программа хорошо закомментирована и достаточно «прозрачна». Изменением констант вы сможете задать другие углы поворота и скорость вращения вала. Следует учитывать, что предельная скорость вращения ограничена конструкцией используемого ШД и не превышает 150...200 оборо-

тов в минуту в зависимости от режима управления. Более сложные алгоритмы управления выходят за рамки данной статьи, но вы можете ознакомиться с ними по приведённым ссылкам.

P.S. Даже эта экспериментальная схема может стать отличным спортивным тренажером... для вашей кошки! Поставьте на вал ШД лазерную указку, направьте световое пятно на пол или стену и включайте устройство. Обещая, ожирение вашему любимцу не грозит.

#### Материалы на русском языке:

<http://www.spetspribor.com/support/articles/step/step.html>  
<http://www.electroprivod.ru/public.htm>  
<http://www.efir-spb.ru/stepmobile.php>  
<http://www.pcb.spb.ru/stat/stat3.html>  
<http://www.pcb.spb.ru/stat/stat1.html>  
<http://www.labview.ru/default.php?article=stepper>

#### Материалы на английском языке:

<http://www.cs.uiowa.edu/%7Ejones/step/>  
<http://www.embedded.com/showArticle.jhtml?articleID=9901153>  
[http://www.audiovisualdevices.com.au/robotics/step\\_test.html](http://www.audiovisualdevices.com.au/robotics/step_test.html)  
[http://www.interq.or.jp/japan/seinoue/e\\_step.htm](http://www.interq.or.jp/japan/seinoue/e_step.htm)  
<http://www.electronics-lab.com/projects/pc/006/>

Текст программ можно скачать на сайте журнала. ©

## Новости мира News of the World Новости мира

### Новое семейство встраиваемых ARM-процессоров

Компания Marvell, лидирующая на рынке встраиваемых RISC-процессоров, вышла с инициативой использования ARM-архитекту-

ры в фирменных SoC и ASIC Marvell, что позволит сократить время вывода изделий на рынок. Недавно компания подписала лицензионное соглашение, которое позволяет фирме производить новое семейство встраиваемых ARM-процессоров. Компания намерена

использовать RISC-технологии, стандартный процесс CMOS и тактовую частоту 500 МГц. Преимущество нового подхода – доступность средств разработки и программного обеспечения от третьих компаний.

[www.marvell.com](http://www.marvell.com)

# Практика применения GSM-модулей NOKIA12 в M2M-приложениях

Александр Елисеев (г. Вильнюс, Литва)

Мобильная связь стала ещё дешевле и доступнее. Производители оборудования рассчитывают на гигантские рынки для мобильных модемов. Но между ними и конечным пользователем стоят разработчики и интеграторы мобильных приложений (в частности, M2M-приложений). Как облегчить жизнь разработчику-интегратору? Одно из решений предлагается в этой статье.

## ВВЕДЕНИЕ

M2M – это сокращение от Machine-to-Machine, существуют также интерпретации machine-to-man и man-to-machine. Таким образом, это обобщающее название многих технологических компонентов, совокупность которых призвана упростить взаимодействие машин с машинами и человека с машинами. Машины в данном контексте – это промышленные или бытовые агрегаты, установки, станки, измерители и прочие устройства, не оборудованные сложными вычислительными комплексами и компьютерами.

В промышленности давно известны технологии проводных и беспроводных локальных сетей между управляющими центрами и удалёнными управляемыми узлами. Технология M2M является новым шагом в построении сетей управления и обмена данными. Охарактеризовать этот шаг можно как глобализацию и распределение. Глобализация подразумевается как географическая, т.е. M2M-сети охватывают объекты, разбросанные на значительных территориях, так и прикладная, т.е. M2M-технология проникает в сферы деятельности, где раньше информационные технологии не могли эффективно применяться. Например, компании, занимающиеся международными перевозками, начинают активно устанавливать контроллеры с GSM-GPS-модулями на транспортные контейнеры для отслеживания перемещения каждого из них и наблюдения за их сохранностью. Железнодорожные компании практикуют установку GSM- и Wi-Fi-модулей совместно с вычислительными модулями на железнодорожные вагоны для сбора диа-

гностической информации, способной предотвратить аварии. Не новой в некоторых странах является практика установки GSM-GPS-модулей на въезжающий транзитный транспорт для контроля за его маршрутом по территории страны, для расчёта дорожных сборов и т.д. Распределение означает, что центр управления как локальное приложение перестаёт существовать, его заменяет большое количество специализированных мобильных приложений и часть функций центра может переноситься на узлы сети, оттесняя в прошлое архитектуру простых телеметрических систем. Например, при управлении контейнерными перевозками логистика, центр технического обслуживания и службы охраны являются физически разделёнными приложениями, обращающимися к одним и тем же контейнерам, снабжённым GSM-модулями, а контейнеры способны самоорганизовываться в логические группы на местах и связываться между собой по другим каналам связи при отказах и для оптимизации трафика.

Вообще как наиболее часто упоминаемые области применения M2M можно назвать следующие:

- сбор телеметрической информации и мониторинг;
- приложения на транспортных средствах;
- управление дорожным движением;
- промышленные приложения;
- охрана и наблюдение;
- торговые автоматы; кассовые аппараты; игровые автоматы;
- управление парками транспортных средств;
- телемедицина;
- публичные информационные сервисы.

Толчком к возникновению M2M явилось появление достаточно дешёвых беспроводных сетей передачи данных, в частности GSM, и одновременно неудовлетворённая потребность рынка в более эффективных решениях организации связи с имеющимся оборудованием и машинными парками. Большая часть машинного парка имеет встроенные системы управления на основе микроконтроллеров, этого, как правило, достаточно, чтобы с минимальными затратами интегрировать в них M2M-технологии.

Двигателем же развития M2M-технологии является совместное желание многих крупных её провайдеров создать новый рынок и утвердить свои роли в нём.

В последнее время на рынке технологий M2M начала активно заявлять о себе фирма Nokia.

Nokia развивает свои решения очень динамично, и это открывает перспективы перед разработчиками и интеграторами в новых формах бизнеса и даёт возможность расширять спектр услуг в сфере M2M.

## ОБЗОР M2M-ПЛАТФОРМЫ NOKIA

До недавних пор разработка сетей управления удалёнными объектами посредством GSM-связи была довольно сложным занятием.

Одним из первых сервисов передачи данных по GSM, используемых в M2M-приложениях, был SMS. Сервис SMS характеризуется высокой стоимостью передачи информации, очень низкой пропускной способностью и негарантированным временем доставки. Для разработки платформы, использующей SMS, нужно было:

- разработать программное обеспечение для микроконтроллера, способное надёжно работать в режиме AT-команд;
- разработать парсер для определения реакции и состояний GSM-модема;
- для сервиса SMS следовало разработать механизмы приёма/передачи

без потери сообщений в цепочке микроконтроллер–модем;

- обдумать механизмы кэширования передачи сообщений;
- разработать стратегию аутентификации и механизмы администрирования сети.

При этом применение AT-команд с одним типом модемов не решало проблемы совместимости с другими. Не менее сложно было разработать надёжное, расширяемое и эффективное приложение, работающее с сетью удалённых устройств через GSM-каналы связи. Один из возможных вариантов архитектуры системы выглядел примерно так, как показано на рис. 1.

Существенными недостатками в такой архитектуре можно признать следующие:

- один или несколько GSM-модемов на стороне управляющего центра принимают всю нагрузку по передаче данных большому количеству удалённых объектов. Это увеличивает время реакции системы и риск потери сообщений;
- на пути следования данных существует два отрезка передачи данных по эфиру, что не способствует повышению надёжности и скорости передачи;
- SMS выполняет роль своеобразного канального протокола. На разработчика ложится ответственность за реализацию всех транспортных, сетевых и прикладных протоколов, работающих в системе, за управление каналами связи, управление доступом, маршрутизацию потоков, удалённое администрирование и т.д.

Сейчас M2M-приложения переходят на применение для передачи данных сервиса GPRS и EGPRS в сетях GSM. GPRS значительно снижает цену трафика и увеличивает скорость. Однако его применение по-прежнему не решает проблему комплексности разработки протоколов верхнего уровня, которые должны обеспечивать надёжность доставки данных, защиту данных, аутентификацию, взаимодействие контроллера с модемом, взаимодействие удалённых приложений с сервером приложений и т.д.

Для решения этой проблемы Nokia разработала свою концепцию M2M-архитектуры (рис. 2). Главной составной частью этой архитектуры явля-

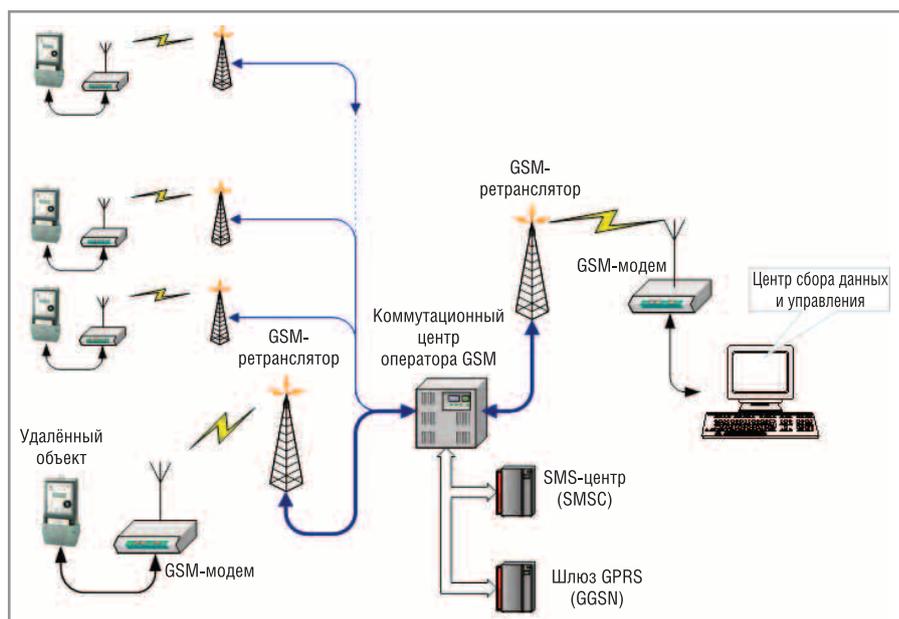


Рис. 1. Архитектура традиционных M2M-решений

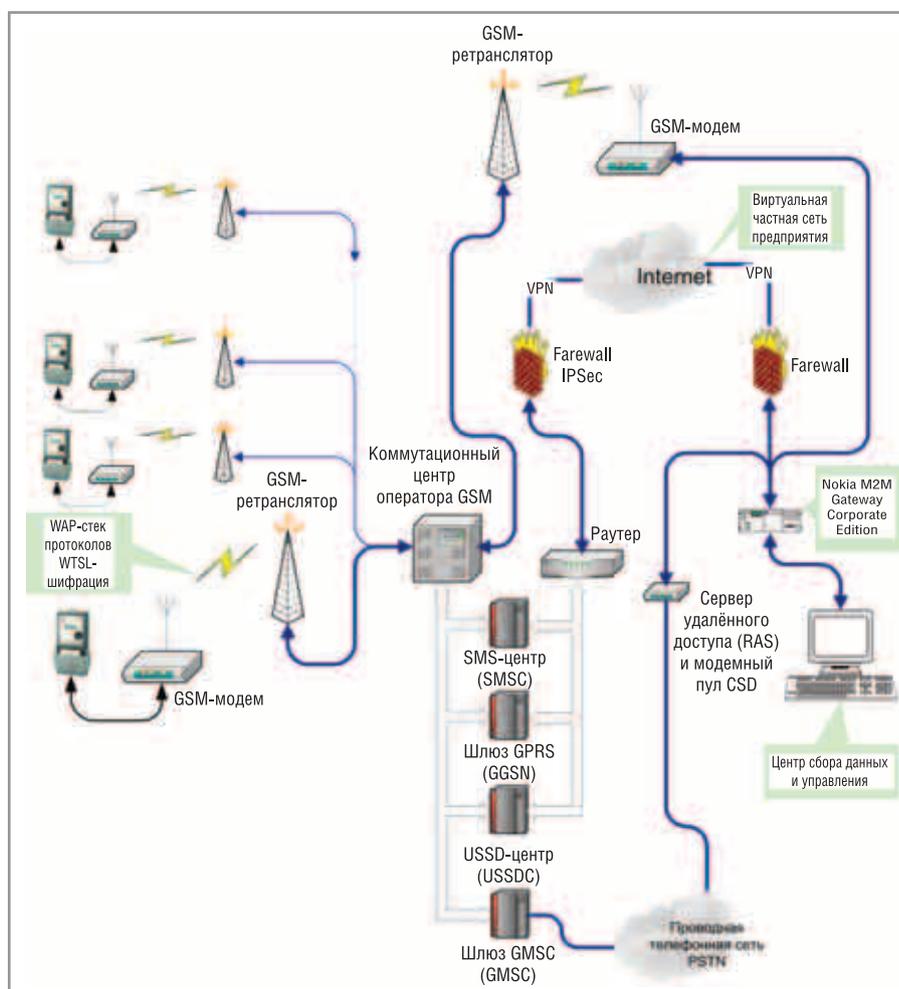


Рис. 2. Архитектура M2M-системы, предлагаемой Nokia

ются GSM-модули нового типа со специализированным набором функций, предназначенных для автоматического интегрирования их в M2M-системы. Другой частью архитектуры, предлагаемой Nokia, является программное обеспечение Nokia

M2M Gateway, играющее роль шлюза между GSM-сетью и удалёнными устройствами с одной стороны и сервером приложений с другой. Как сервер приложений в узком смысле здесь может выступать программа пользователя, которая взаимодействует с



Рис. 3. Внешний вид NOKIA30 и NOKIA31

удалёнными устройствами через GSM-сеть.

M2M Gateway выполняет ряд важных функций в M2M-архитектуре Nokia:

- функцию моста между двумя половинами M2M-архитектуры: сервером приложений и приложениями на удалённых устройствах. Каждая из двух половин знает только одну точку доступа к другой половине – это мост. Мост скрывает для каждой из половин сложность реализации и адресации в другой половине. Для этого был разработан специальный протокол сетевого уровня WIOP;
- управление сервисами передачи данных. В GSM-сетях на сегодня существуют разнообразные сервисы передачи данных, среди которых: CSD (данные по «голосовому» каналу), SMS (сервис коротких сообщений), GPRS (пакетная передача данных), EDGE или EGPRS (протокол с повышенной скоростью передачи), HSCSD (высокоскоростной CSD), USSD (дополнительный сессионный протокол передачи данных). M2M Gateway позволяет приложениям легко выбирать для коммуникации любой из них, не меняя прикладные протоколы;
- управление доступом. M2M Gateway поддерживает базу данных с паролями, идентификационными номерами и телефонными номерами GSM-модемов. Аутентификация при установке соединения происходит автоматически без участия приложения пользователя с помощью сервиса RADIUS (для CSD и GPRS) или MSISDN (для SMS);
- сбор статистики, данных для биллинга и регистрация событий;
- поиск объектов и маршрутизация. M2M Gateway для приложений пользователя предлагает программный интерфейс по спецификации CORBA. Для поддержки этой спецификации необходим сервис имён

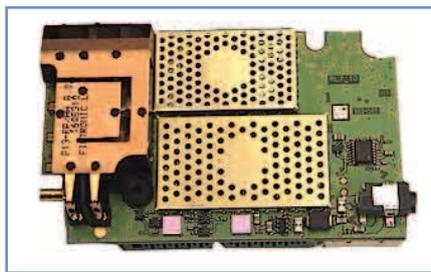


Рис. 4. NOKIA30 без корпуса

для поиска адресов различных типов, зависящих от среды передачи. Nokia специально для GSM-сетей создала свою реализацию сервера имён, названную Active Naming-Context.

Как видно на рис. 2, M2M Gateway может одновременно работать по трём разным физическим каналам передачи данных. Первый – традиционный канал – через локальный GSM-модем со всеми доступными сервисами передачи данных. Второй – это подключение через Интернет с использованием технологии виртуальных частных сетей к серверному оборудованию провайдера GSM-связи. Третий – это подключение к публичным телефонным сетям через модемный пул. При этом сервер приложений и приложения на удалённых устройствах для всех случаев используют один унифицированный программный интерфейс, основанный на спецификации CORBA, и даже могут быть не уведомлены об используемых сервисах передачи данных и физических маршрутах на пути к M2M Gateway.

Особенностью M2M Gateway также является то, что он полностью написан на Java. Разработка приложений для него может быть выполнена на свободно распространяемом программном обеспечении, хотя цена самого M2M Gateway довольно высока.

Третьей частью архитектуры Nokia является открытое программное обеспечение промежуточного уровня, которое делает взаимодействие с сервером приложений прозрачным и независимым от типа сервиса передачи данных в GSM-сети, а также протоколы канального и сетевого уровня для приложений пользователя, работающих на удалённых устройствах. Nokia предоставляет все исходные тексты программного обеспечения с подробными инструкциями для переноса на встраиваемые системы, всю документацию,

включая схемы для создания эталонной встраиваемой платформы на базе микроконтроллеров серии H8S, а также саму эталонную встраиваемую платформу под названием Smart Adapter.

Nokia также выделила нового участника в бизнес-схеме для M2M-решений: это провайдер M2M-сервисов. Nokia M2M Gateway может поставляться в специальной редакции, позволяющей шлюзу предоставлять свои услуги сторонним серверам приложений через специальное клиентское программное обеспечение. Провайдер, он же владелец шлюза, как правило, берёт на себя проблемы биллинга и всю техническую поддержку M2M-платформы, упрощая разработку, развёртывание и эксплуатацию M2M-решений для конечных пользователей.

В результате M2M-архитектура сокращает время и снижает риски разработки, улучшает масштабируемость, т.е. способность к увеличению количества узлов, распределяет трафик и увеличивает надёжность связи за счёт резервирования, позволяет подключить в сеть огромное количество узлов (как утверждается, вплоть до 1 миллиона) без заметного влияния на время реакции, упрощает администрирование.

## GSM-модули Nokia

Nokia предлагает три модели GSM-модулей: NOKIA31, NOKIA30 и NOKIA12. NOKIA30 и NOKIA31 представляют собой автономные GSM-терминалы, внешне не отличающиеся друг от друга (рис. 3, 4), но работающие в разных частотных диапазонах: 900/1800 МГц и 850/1900 МГц соответственно. При этом NOKIA31 поставляется с более старым программным обеспечением и не поддерживает некоторых возможностей, которые есть в NOKIA30.

Краткие технические характеристики модулей NOKIA 30 и NOKIA 31:

Максимальная скорость по GPRS	56 Кбит/с
Максимальная скорость по HSCSD	43,2 Кбит/с
Максимальная скорость по CSD	14,4 Кбит/с
Сервисы сообщений	SMS, USSD (MO, MT)
Напряжение питания	6,2...14 В
Температура эксплуатации	-10...+55°C

NOKIA 12 (рис. 5) представляет собой бескорпусный модуль без антен-

ны и держателя SIM, но гораздо меньшего размера, чем NOKIA30.

Следует также отметить, что NOKIA12 является новейшей моделью фирмы Nokia и поддерживает многие функции, не реализованные в NOKIA30, а производство NOKIA30 и NOKIA 31 в скором времени может быть прекращено.

Краткие технические характеристики модуля NOKIA12:

Максимальная скорость по EDGE	118,4 Кбит/с
Максимальная скорость по GPRS	114 Кбит/с
Максимальная скорость по HSCSD	43,2 Кбит/с
Максимальная скорость по CSD	14,4 Кбит/с (V.42bis)
Сервисы сообщений	SMS, USSD (MO, MT)
Аналоговые входы	3
Цифровые входы	8
Цифровые выходы	9
Последовательные интерфейсы	3
Напряжение питания	3,6...4 В
Температура эксплуатации	-25...+55°C

Все представленные модули NOKIA снабжены системным 60-контактным разъёмом, служащим интерфейсом для внешних устройств. Через этот разъём выведены аудиосигналы модуля, сигналы нескольких последовательных связанных интерфейсов, сигналы цифровых и аналоговых входов, сигналы цифровых выходов и другие сигналы.

Далее будем рассматривать только характеристики модуля NOKIA12. Цоколёвка модуля приведена в таблице.

Модуль способен выполнять загружаемые Java-программы, называемые IMlet, согласно спецификации J2ME и профилю информационного модуля IMP1.0. Это значит, что программы для NOKIA12 пишутся так же, как и для мобильных телефонов, за исключением того, что они не могут использовать интерфейс пользователя.

JAR-файл, загружаемый в модуль с запакованными IMlet, не может превышать 128 Кб. В распоряжении IMlet находится до 256 Кб ОЗУ модуля в виде динамически выделяемой памяти. Всего для работы с IMlet и их хранения в модуле доступно 1 Мб flash-памяти. Количество Java-поток в одном IMlet явно ничем не ограничивается. В модуль может

быть загружено несколько IMlet. Только один из них может быть назначен активным. При включении модуля запуск активного IMlet происходит автоматически. Скорость выполнения IMlet не специфицируется, она сильно зависит от загрузки процессора модуля основными задачами. По опыту применения, например, команды ввода/вывода в порт выполняются около 1 мс, при тяжёлой нагрузке процессора и работе Java-сборщика мусора это время может увеличиться в 100 раз.

Модуль для выполняемых IMlet предоставляет большой набор встроенных прикладных программных интерфейсов (API). Это:

- работа с портами ввода/вывода (IO Control API);
  - отправка/приём сообщений SMS, установка голосовых соединений и проч. (Wireless Messaging API);
  - работа с интерфейсами CORBA (ORB API);
  - работа с последовательными портами для обмена с внешними устройствами (Serial Port API);
  - работа с потоками данных и подключениями через TCP/IP (Java Socket API);
  - чтение и генерация web-страниц с автоматической генерацией заголовков и парсингом (HTTP);
  - чтение и запись реального времени;
  - работа со сторожевым таймером, обеспечивающим аппаратный сброс модуля при зависаниях (Watchdog API).
- Через CORBA-интерфейсы, содержащиеся в модуле, можно:
- управлять загрузкой и запуском IMlet локально через последовательный интерфейс и удалённо через GSM-каналы связи,
  - посылать и отправлять SMS-сообщения,
  - обновлять программное обеспечение на внешнем устройстве через последовательный порт с помощью специального протокола,
  - управлять состоянием линий ввода/вывода,
  - обмениваться данными с внешним приёмником GPS через последовательный порт,
  - устанавливать большое количество параметров, управляющих работой модуля.

Уникальность в том, что все CORBA-интерфейсы модуля доступны не только для IMlet, работающих внутри



Рис. 5. Внешний вид NOKIA12

модуля, но и для внешних устройств, подключённых через последовательные интерфейсы, и для сервера приложений через M2M Gateway.

В модуле NOKIA12 можно выделить три режима работы:

- режим управления пользователем,
- режим AT-команд,
- M2M-режим.

Разделение на режимы довольно условно, поскольку все режимы могут использоваться одновременно.

## РЕЖИМ УПРАВЛЕНИЯ

Модуль работает как простое устройство ввода-вывода, управляемое при помощи SMS и не требующее для своей работы никакого внешнего контроллера. В модуле уже predefined список из 22 типов SMS-команд. Набор команд достаточно гибкий и включает такие команды, как: считывание, установка, сброс, инверсия состояния цифровых портов (как групповая, так и индивидуальная), генерация импульсов на цифровых выходах, считывание состояния аналоговых входов, установка пароля, считывание координат от внешнего GPS-приёмника, установка граничных уровней для аналоговых входов, при достижении которых модуль отправляет автоматически предупреждающие сообщения. Командам также можно присваивать псевдонимы и пользоваться ими вместо стандартных имён команд.

Для создания автономного устройства в дополнение к модулю необходима некоторая аппаратная часть, содержащая цепи согласования уровней напряжения, реле, источник питания и прочее, но её цена существенно ниже обычной микроконтроллерной схемы.

## РЕЖИМ AT-КОМАНД

В этом режиме NOKIA12 подобен GSM-модему. AT-команды служат только для управления работой NOKIA12

как коммуникационного модема. С помощью них можно установить голосовое соединение, ответить на звонок, установить соединение для передачи данных, отправить факс, выйти в Интернет (установив соединение с помощью PPP-протокола), вести операции с памятью SIM-карточки и т.д.

## Режим M2M

Это наиболее интересный режим работы NOKIA12 и наиболее эффективный с точки зрения применения.

Модуль в этом режиме работает в паре с внешним устройством на базе микроконтроллера или компьютера и взаимодействует с удалённым сервером приложений через M2M Gateway.

В этом режиме могут работать 1-й или 2-й последовательные порты модуля. Порт модуля при этом работает по так называемому M2M-протоколу. Согласно модели OSI, M2M-протокол является протоколом канального уровня (Data Link Layer), поверх кото-

рого располагается транспортный протокол GIOP программного обеспечения по спецификации CORBA.

CORBA больше известна прикладным программистам распределённых корпоративных бизнес-приложений. Спецификация CORBA была создана для облегчения программирования взаимодействия приложений, работающих на разных программных и аппаратных платформах и в режиме реального времени. CORBA в распределённых приложениях даёт те же преимущества, что и объектно-ориентированное программирование в сосредоточенных, это: инкапсуляция, наследование интерфейсов, полиморфизм и поддержка исключений. Важен набор способов взаимодействия объектов CORBA, это: клиент-сервер, точка-точка, публикация-подписка.

CORBA – большая и сложная спецификация, но, тем не менее, существуют её простые реализации для встраиваемых приложений. CORBA находит широкое применение в авиации, в том числе военной, в космической отрасли, используется в больших исследовательских центрах, а также при построении M2M-архитектур и т.п. Говоря упрощённо, CORBA позволяет программе дистанционно по сети вызывать функции на другом устройстве с передачей и возвратом параметров так, как будто они являются локальными функциями в этой же программе. Эта концепция хорошо знакома программистам Windows по программным интерфейсам DCOM и COM+.

В режиме M2M внешнее устройство может через CORBA-интерфейсы вызывать различные функции и устанавливать параметры в подключённом к нему модуле NOKIA12, на удалённом сервере приложений через M2M Gateway или на любом другом удалённом устройстве с модулями Nokia, включённом в архитектуру M2M. Соответственно все другие удалённые устройства и приложения могут иметь доступ к любой функции и параметру данного внешнего устройства, которые оно сделало доступными через программный CORBA-интерфейс.

## ЭКОНОМНОЕ РЕШЕНИЕ

Чтобы стимулировать программистов к применению своих решений, Nokia разработала платформу для

### Цоколёвка системного разъёма модуля NOKIA12

Номер вывода	Условное обозначение	Описание
1, 3, 5, 7, 9	VBB	Питание 3,6...4 В. Средний ток около 500 мА, в пике до 2 А
2, 4, 6, 8, 10	GND	Общий
12, 14, 28, 60	NC	Не подключён
15, 17	MICP, MICN	Вход микрофона
16, 18	EARP, EARN	Выход на динамик
19	AD3	Вход 10-битного АЦП
20	AD2	Вход 10-битного АЦП
21	PCMDCLK	Вход строба для цифрового аудиоканала
22	PCMSCLK	Строб фрейма цифрового аудиоканала
23	PCMTX	Выход цифрового аудиоканала
24	PCMRX	Вход цифрового аудиоканала
25	RESET T	Вход внешнего аппаратного сброса модуля
26	RESET A	Выход для сброса внешнего устройства
27	PORT1RX	Вход данных последовательного интерфейса 1
29	PORT1TX	Выход данных последовательного интерфейса 1
30	OUTPUT2	Цифровой выход или сигнал DCD интерфейса 1
31	OUTPUT3	Цифровой выход или сигнал DSR интерфейса 1
32	OUTPUT4	Цифровой выход или сигнал CTS интерфейса 1
33	OUTPUT5	Цифровой выход или сигнал RI интерфейса 1
34	INPUT6	Цифровой вход или сигнал RTS интерфейса 1
35	INPUT5	Цифровой вход или сигнал DTR интерфейса 1
36	AD1	Вход 10-битного АЦП
37	BSI	Установка режима работы интерфейса 1
38	PORT2RX	Вход данных последовательного интерфейса 2
39	PORT2TX	Выход данных последовательного интерфейса 2
40	PORT2RTS	Вход сигнала RTS интерфейса 2
41	PORT2CTS	Выход сигнала CTS интерфейса 2
42	OUTPUT8	Цифровой выход
43	INPUT8	Цифровой вход
44	OUTPUT9	Цифровой выход
45	SLEEPX	Выход, индицирующий состояние ожидания модуля
46	INPUT11	Цифровой вход
47	VSIM	Выход напряжения питания SIM-карты
48	SIMRST	Выход сигнала сброса SIM-карты
49	SIMCLK	Выход сигнала тактирования SIM-карты
50	SIMDATA	Двунаправленный сигнал данных SIM-карты
51	SIMDET	Вход сигнала присутствия SIM-карты
52	IO VOTAGE	Вход напряжения, определяющего логические уровни портов
53	OUTPUT1/P3RX	Цифровой выход или вход данных интерфейса 3
54	INPUT4/P3TX	Цифровой вход или выход данных интерфейса 3
55	INPUT10	Цифровой вход
56	INPUT7	Цифровой вход
57	OUTPUT6	Цифровой выход
58	OUTPUT7	Цифровой выход
59	INPUT9	Цифровой вход

разработчика приложений, названную Nokia M2M Application Development Kit, на базе 16-битного микроконтроллера HD6412322TE201 серии H8S фирмы Renesas (бывшая Hitachi). Nokia сопроводила эту платформу всеми исходными текстами программы (кроме исходных текстов операционной системы, которые подлежат лицензированию), реализующей законченное тестовое приложение удалённого устройства M2M-архитектуры, которое включает CORBA, ORB, GIOP, M2M, адаптированную RTOS и работу с портами ввода/вывода.

Однако большинство разработчиков-интеграторов M2M-решений – это небольшие фирмы, и им, как правило, не под силу приобрести дорогой NOKIA M2M Gateway. Использование M2M Gateway подразумевает также тесное сотрудничество с оператором GSM-сети, установку дорогого серверного оборудования и организацию выделенных физических линий от шлюза до коммуникационного центра оператора.

Разработке программного обеспечения, аналогичного M2M Gateway, препятствует недостаточная открытость протоколов работы модулей NOKIA12 в GSM-сети, кроме того, для замены M2M Gateway нужна ещё полнофункциональная реализация WAP-сервера, поскольку таковым на низком уровне для сети GSM является M2M Gateway.

Nokia, понимая эту ситуацию, предложила разработчикам другой вариант решения. Он заключается в простом предоставлении программного интерфейса сокетов. Интерфейс сокетов содержит набор функций для организации соединения, передачи потока данных по этому соединению и получения информации о соединении. Для соединений в сокетах Nokia тип протокола, используемого для передачи данных, изначально не определён, он устанавливается при инициализации соединения. Важно, что соединение гарантирует целостность передачи данных и их непротиворечивость, т.е. после их приёма не нужно удостоверяться в правильности данных и порядка их поступления.

Программные модули, реализующие интерфейс сокетов, располагаются как во внешнем устройстве, так

и в модуле NOKIA12. Сокеты NOKIA служат для обмена данными внутри приложения пользователя во внешнем устройстве, для обмена данными между приложением пользователя и IMlet, работающими внутри GSM-модуля, и для обмена данными по протоколу TCP/IP через сеть GSM между приложением пользователя и приложениями на других удалённых устройствах. Для этого протокол M2M был модифицирован для туннелирования IP-трафика и переименован в M2M System Protocol 2 (в дальнейшем M2M SP2).

Унификация передачи данных в модуль и на другие удалённые устройства с помощью интерфейса сокетов приводит к уменьшению количества разных протоколов, работающих в микроконтроллере, и упрощает программирование приложений. Приложение пользователя и IMlet, работающие в модуле, могут продолжать оставаться единым программным комплексом, основанным на CORBA, поскольку M2M SP2 совместим с первой версией M2M-протокола.

### Анализ альтернативных решений

M2M SP2 – это упрощение первоначальной идеи, основанной на концепции шлюза и CORBA. В последнее время многие производители стремятся упростить интеграцию своих GSM-модулей в M2M-системы, предоставляют пользователям простые интерфейсы для обмена данными с помощью TCP/IP-протокола. TCP/IP-протокол даёт возможность обмениваться данными с любым компьютером или устройством через Интернет и обеспечивает целостность и непротиворечивость потоков данных. Наличие в модуле TCP/IP делает возможным использование в паре с ним микроконтроллеров с экстремально малыми ресурсами оперативной и постоянной памяти, способных, тем не менее, исполнять роль web-серверов, e-mail-клиентов и т.д. и при этом продолжать обрабатывать внешние сигналы в реальном времени.

Здесь приведён обзор некоторых GSM-модулей, предоставляющих простые сервисы для подключений через TCP/IP. Внимание акцентируется не на скорости передачи (эффективная скорость обмена в M2M больше опре-

деляется временем квитирования в GSM-сетях) и других технических параметрах, а лишь на удобстве реализации пользовательского приложения.

### GM862-GPRS фирмы TELIT

Предлагается сервис под названием EASY GPRS. Используются специальные AT-команды для настройки параметров соединения (доменное имя сервера, порт, имя пользователя, пароль и т.д.) и инициализации соединения. После установления соединения обмен происходит ASCII-символами, как принято в протоколах HTTP, SMTP и др.

Недостатки: возможно только клиентское соединение и только одно, использовать можно только передачу данных по GPRS, CSD использовать невозможно. Обмен ведётся в ASCII-формат, и невозможно работать с бинарными протоколами. Требуется специфичный парсер AT-команд.

### WISMO Quik Q2406 фирмы WAVESOM

Используются специальные AT-команды для настройки параметров TCP-соединения (доменное имя сервера, порт, имя пользователя, пароль и т.д.) и инициализации соединения.

После установления соединения обмен происходит ASCII-символами.

Возможны как клиентские, так и серверные соединения. Существует набор специальных AT-команд для прямой работы по прикладным протоколам FTP (пересылка файлов), SMTP (отправка e-mail), POP3 (приём e-mail).

Недостатки: возможно только одно соединение. При прозрачной передаче данных по TCP/IP есть трудности с управлением соединением. Нет возможности отправки UDP-пакетов. Требуется специфичный парсер AT-команд.

Wavesom для своих моделей также предлагает сервис OpenAT. Сервис заключается в том, что можно загружать в GSM-модули и выполнять программы, написанные на C или C++, используя часть ресурсов 32-битного процессора модуля. При этом предоставляются богатые наборы библиотек. Они обеспечивают почти полный стек протоколов TCP/IP, функции работы с портами ввода-вы-

вода, некоторые промышленные последовательные протоколы, удалённое обновление программного обеспечения и т.д. Однако, несмотря на 32-битный процессор, максимальная производительность пользовательских программ не может превысить 5 MIPS при полной остановке функций GSM-модема и 1,5 MIPS при полной загрузке GSM-модема. Для пользовательских программ предоставляются весьма ограниченные ресурсы оперативной памяти – до 64 Кб. Это может вызвать трудности при применении вытесняющих RTOS и выделении памяти с использованием механизма HEAP в серьезных приложениях, на которые претендует данный GSM-модуль.

### ТС45 ФИРМЫ SIEMENS

Специальных команд для работы по TCP/IP через внешние порты нет. Но модули, так же как и NOKIA12, могут программироваться на Java по спецификации J2ME и профилю IMP1.0. Соответственно из Java-приложений открыт доступ к TCP-стеку протоколов, как это определено в IMP 1.0. В Интернете можно найти примеры Java-программ для ТС45, которые организуют прозрачный обмен через RS232 по TCP/IP.

Предоставляемые ТС45 дополнительные API имеют не такой состав, как у NOKIA12. Имеется, например, такой оригинальный API, как API AT-команд.

Модули Siemens имеют внутрисхемный отладчик Java-приложений в отличие от NOKIA12. Скорость выполнения Java-программы – около 700 инструкций в секунду при пассивной работе модема. Имеются многочисленные режимы пониженного потребления модулей. В модуль встроена аппаратная схема зарядки внешних Li-Ion-аккумуляторов. Недостаток внешних последовательных портов у ТС45 компенсируется специальным протоколом организации виртуальных каналов на одном последовательном порте.

Недостатки: требуется разработка протокола виртуальных каналов и программы на Java.

### МОТОРОЛА G20 ФИРМЫ MOTOROLA

Используются специальные AT-команды для настройки параметров

TCP-соединения (доменное имя сервера, порт, номер сокета и т.д.) и инициализации соединения. Есть возможность работы по четырём сокетам одновременно.

Модуль декларируется как самый маленький на сегодняшний день. Имеет USB-интерфейс, правда, он не может работать одновременно с внешним последовательным интерфейсом.

Тактовая частота процессора 26 МГц. Имеет возможность поддержки приложений в SIM-картах.

Недостатки: передача данных по TCP/IP не прозрачна, требуется переформатирование. В текущей версии нет возможности открытия серверных подключений. Требуется специфичный парсер AT-команд.

### GR 47 ПРОИЗВОДСТВА SONY ERICSSON

Используются специальные AT-команды для настройки параметров TCP-соединения (доменное имя сервера, порт, имя и пароль пользователя и т.д.) и инициализации соединения.

Удобное управление соединением с помощью выделенной сигнальной линии DTR, что обеспечивает прозрачную передачу данных.

Могут программироваться на специальном интерпретируемом языке (скрипте) с синтаксисом, повторяющем синтаксис языка C. Для программы выделяется 44 Кб постоянной памяти и 25 Кб оперативной.

Недостатки: возможно только одно соединение. Передача возможна только по GPRS. В текущей версии нет возможности открытия серверных подключений. Требуется специфичный парсер AT-команд.

Надо отметить, что во многих случаях увеличение цены GSM-модуля за счёт его свойств внутреннего программирования превышает цену дополнительного внешнего устройства с микроконтроллером, которое необходимо для обычных GSM-модулей. Например, 32-разрядный микроконтроллер с производительностью 60 MIPS, внешней flash-памятью 2 Мб и оперативной памятью 512 Кб обойдутся в 16 евро, в этом же диапазоне находится разница в цене между обычным и программируемым GSM-модулем. При этом внешний микроконтроллер в любом случае

обладает большей производительностью и предоставляет больше удобств на этапе разработки. И разница остаётся только в объёме дополнительно создаваемого программного кода и времени на его создание.

Как видно из анализа, производители стремятся оставить пользователям старый и знакомый интерфейс AT-команд, который плохо совместим со стекком протоколов TCP/IP, а потому накладывает на работу с ним сильные ограничения. В этом смысле идея Nokia по разработке канального протокола M2M SP2 является новаторской.

M2M SP2 предоставляет следующие удобства (с точки зрения традиционного программиста встроенных систем с опытом программирования микроконтроллеров на C):

- не надо программировать на Java;
- не надо программировать аппаратные платформы третьих фирм;
- не надо программировать парсинг AT-команд;
- пользователь может разрабатывать приложения, не выходя за рамки привычной для него микроконтроллерной платформы;
- исходные тексты, предлагаемые Nokia, написаны на чистом ANSI C и легко могут быть перенесены на любой микроконтроллер от 8-разрядного до 64-разрядного и любой C-компилятор в течение нескольких рабочих дней;
- программные модули M2M SP2 строятся на основе сервисов потоков операционной системы, а потому оптимально используют процессорное время;
- пользователю предоставляется очень простой программный интерфейс сокетов;
- сокет может использовать передачу данных как по CSD, так и по GPRS, прозрачно для пользователя, канал передачи может быть дистанционно изменён без уведомления программы пользователя;
- сокет может использоваться для передачи любых двоичных данных как TCP-пакетами, так и UDP-пакетами;
- количество одновременных TCP-подключений ограничено только объёмом памяти микроконтроллера и GSM-модуля;
- оставлена полная совместимость с M2M-протоколом первой версии.

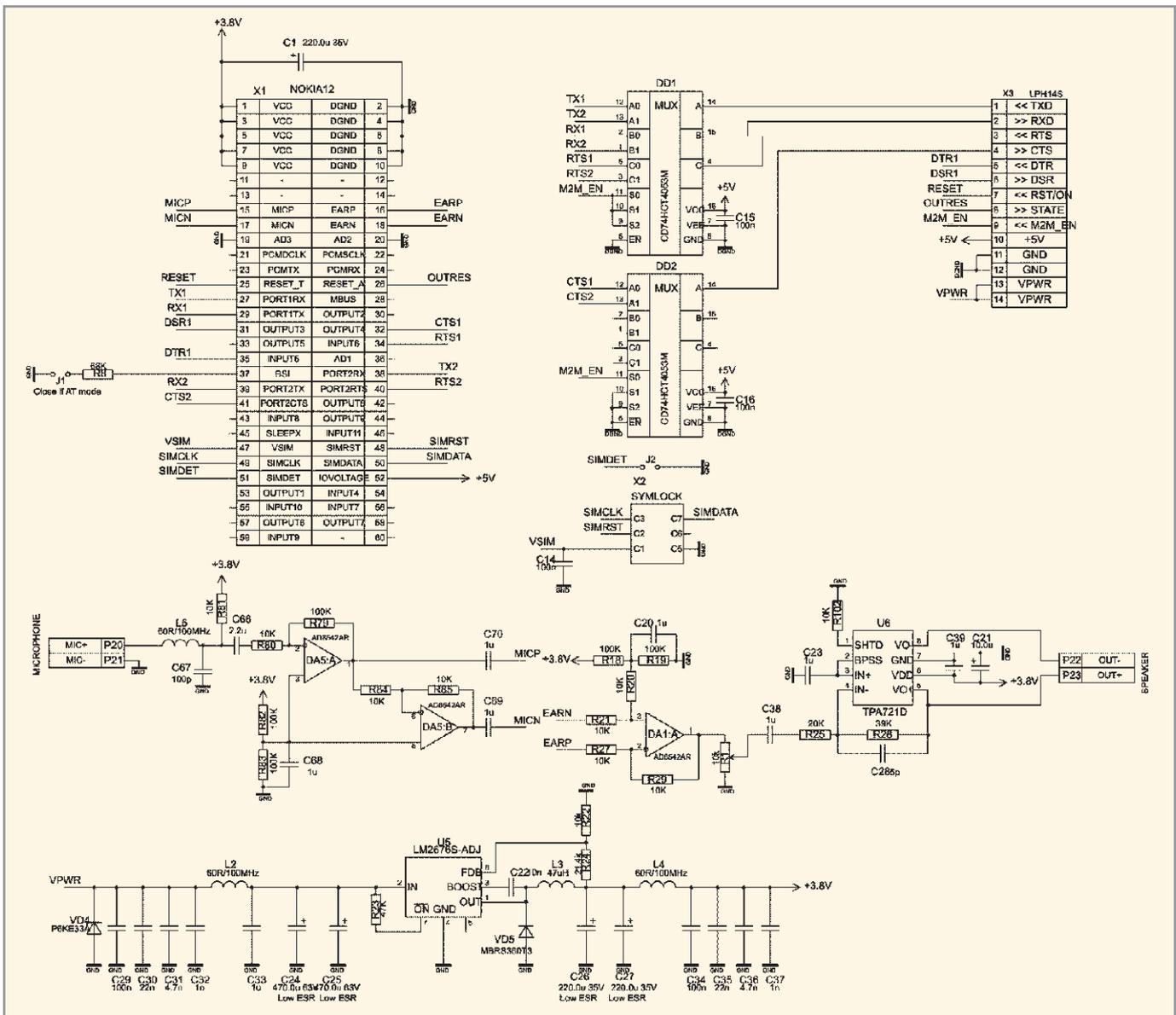


Рис. 6. Схема дополнительной платы к универсальному микроконтроллеру для M2M

## ПРИМЕР УНИВЕРСАЛЬНОГО МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ M2M

Инженеры нашей фирмы провели адаптацию программного обеспечения Nokia для разработанной нами аппаратной платформы на базе 32-битного микроконтроллера LPC2106 фирмы Philips. Микроконтроллеры этого семейства отличает низкая цена и высокая производительность.

Исходные тексты интерфейса сокетов были отредактированы так, чтобы они могли выполняться в среде операционной системы uCOS-II и использовали UART, имеющиеся в распоряжении микроконтроллера, поскольку первоначально они были разработаны для операционной системы Windows.

Операционная система uCOS-II пользуется большой популярностью в среде разработчиков встроенных сис-

тем во многом благодаря её простоте и низкой стоимости. Инженеры фирмы Nokia её тоже не обходят вниманием и даже предоставили пример реализации M2M-протокола первой версии с использованием uCOS-II. И это заметно облегчило адаптацию M2M SP2.

uCOS-II является операционной системой реального времени (Real Time Operating System – RTOS). О назначении и преимуществах RTOS можно рассказывать долго, но главное в этом проекте то, что RTOS помогает с минимальными модификациями применять в своих приложениях программное обеспечение третьих фирм, не создавая конфликтов при использовании разделяемых ресурсов контроллера, таких как память и процессорное время.

На рис. 6 показана схема дополнительной платы к контроллеру, содержащая GSM-модуль NOKIA12.

Для подключения к GSM-модулю используются его два последовательных порта. Чтобы не выделять для них два UART-микроконтроллера, было использовано мультиплексирование сигналов последовательных портов. Один из портов используется в режиме AT-команд, другой – в режиме M2M. Для сопряжения выводов модуля с уровнями напряжения внешних сигналов в нём предусмотрен вход для подачи внешнего напряжения IOVOLTAGE, которое питает выходные буферы модуля. Плата содержит схему согласования аудиосигналов модуля с динамиком и микрофоном. Микросхема U6 является усилителем мощности аудиосигнала. Для питания модуля используется импульсный стабилизатор напряжения с возможностью выдерживать токи до 2 А. К контроллеру плата подсоединяется через разъём X3.

# Ключ защиты LPT-PRO

Олег Вальпа (Челябинская обл.)

В этой статье приведено описание аппаратно-программного ключа, подключаемого к LPT-порту для защиты программного обеспечения от пиратского копирования.

Аппаратный способ защиты программного обеспечения считается более эффективным по сравнению с программным способом защиты. Это объясняется в первую очередь тем, что тиражирование аппаратного ключа – неростое дело в отличие от простого копирования номера программного продукта. Предлагаемый здесь аппаратный электронный ключ, кроме того, имеет скрытый программный код, полностью защищённый от чтения. Таким образом, ворованной программой, защищённой таким ключом, просто невозможно будет воспользоваться.

Описываемый здесь аппаратный ключ под названием LPT-PRO выполнен на базе недорогого микроконтроллера серии AVR фирмы Atmel. Конструктивно ключ защиты изготавливается в виде переходника и подключается между LPT-портом компьютера и принтером. При этом он не мешает работе компьютера с принтером. Для лучшего понимания схемы и работы ключа рекомендую вспомнить все сигналы LPT-порта и их назначение. Эти сигналы и сам LPT-порт довольно подробно описаны в статье [1]. На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема ключа.

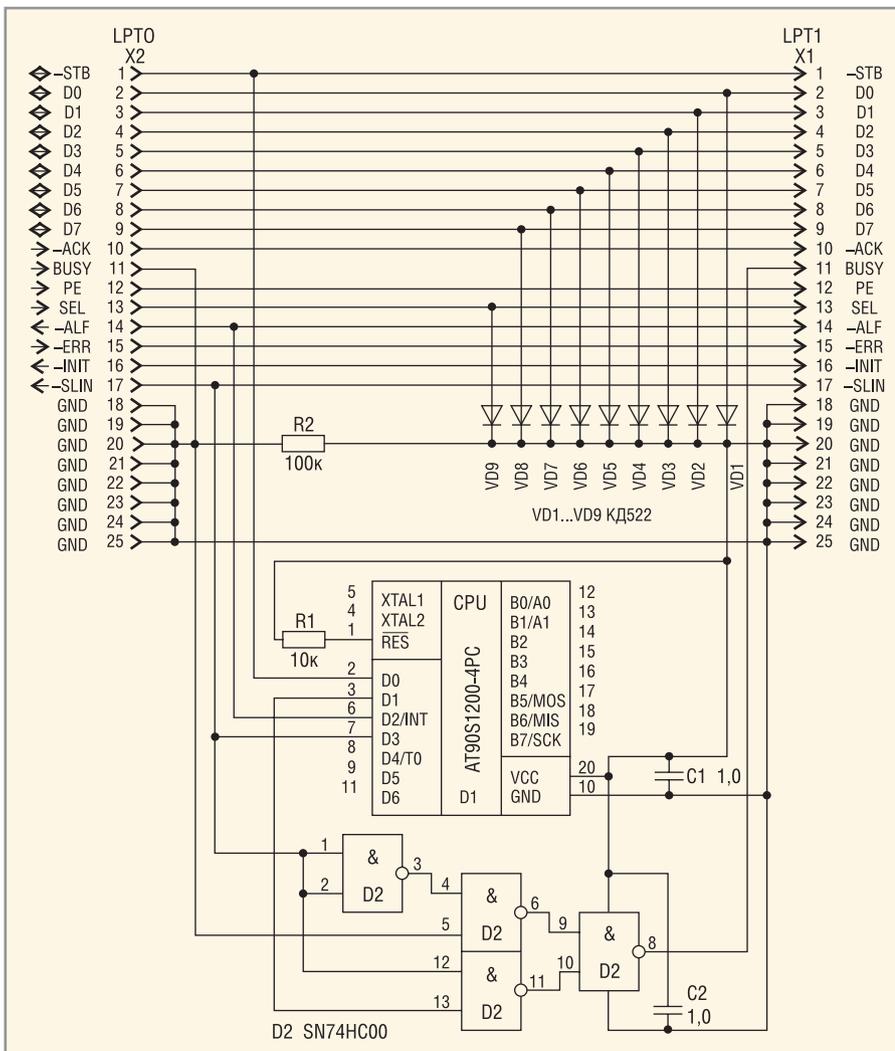


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема аппаратного ключа

Основным элементом схемы является микроконтроллер D1. Он имеет широкий диапазон питающего напряжения 2,7...6 В и низкое потребление тока. Благодаря этому его можно питать непосредственно от сигнальных линий самого порта LPT. Для этого используются развязывающие диоды VD1...VD9, которые обеспечивают питание микроконтроллера от любой из восьми линий данных LPT-порта. Кроме микроконтроллера в схеме применяется низкочастотная логическая микросхема D2, которая мультиплексирует входной для LPT-порта сигнал BUSY между микроконтроллером и принтером. Управление микроконтроллером происходит с помощью сигнала -SLIN. Этот сигнал имеет активное низкое состояние во время обращения компьютера к принтеру. Микроконтроллер контролирует состояние сигнала -SLIN после своей активизации и игнорирует все сигналы на других линиях, если этот сигнал активен. Для активизации микроконтроллера используется сигнал -AL, подключённый к входу прерывания. Этот же сигнал используется для синхронизации данных, передаваемых последовательно от компьютера микроконтроллеру электронного ключа по сигнальному проводу -STB. В свою очередь микроконтроллер передаёт последовательно данные компьютеру по сигнальному проводу BUSY. Оба эти процесса происходят одновременно за счёт разных линий связи приёма и передачи данных.

Элементы ключа LPT-PRO располагаются на двухсторонней печатной плате, специально разработанной автором для этого устройства. На рис. 2 показаны верхняя и нижняя стороны этой платы.

Сборочные чертежи платы с габаритами платы и обозначениями элементов для установки с верхней и нижней сторон печатной платы приведены на рис. 3.

Рабочая программа для микроконтроллера ключа написана на Ассемблере для AVR и приведена ниже.

## Текст программы для микроконтроллера ключа LPT-PRO

```
,*****
;Программа lpt-pro для микро-
;контроллера ключа защиты LPT-
;PRO
```

```

;Версия: 1.0
;Дата: 27.02.2004
;*****
.include "1200def.inc"
;Включить файл описания регистров
.LIST ;Включить листинг
.CSEG ;Начало кода программы
;Константы и определения переменных
.DEF Byte=r16
.DEF Count=r18
.DEF Byte0=r19
.DEF Byte1=r20
.DEF Byte2=r21
.DEF Byte3=r22
.DEF Byte4=r23
.DEF Byte5=r24
.DEF Byte6=r25
.DEF Byte7=r26
.DEF Temp=r31
;%%%%%%%%%%
;Вектора прерываний
;%%%%%%%%%%
.ORG 0 ;Стартовый адрес
rjmp RESET ;Переход по сбросу
rjmp EXT_INT0 ;Переход по прерыванию IRQ0
rjmp TIM0_OVF ;Переход по прерыванию переполнения таймера
rjmp ANA_COMP ;Переход по прерыванию аналогового компаратора
;@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
;Основной модуль
;@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
RESET:
cli ;Запретить прерывания
ldi Temp,0 ;Настроить порты на ввод
out DDRB,Temp
out DDRD,Temp
ldi Temp,0xff ;Включить pull-up резисторы
out PORTB,Temp
ldi Temp,0x72
out PORTD,Temp
ldi Temp,0x40
out GIMSK,Temp
ldi Temp,0x30
out MCUCR,Temp
UnLoop: sei ;Разрешить прерывания
sleep ;Перейти в режим Power Down
rjmp UnLoop ;Ждать импульса на входе INT0
;%%%%%%%%%%
;Подпрограмма обработки прерывания таймера
;%%%%%%%%%%
TIM0_OVF:nop
reti

```

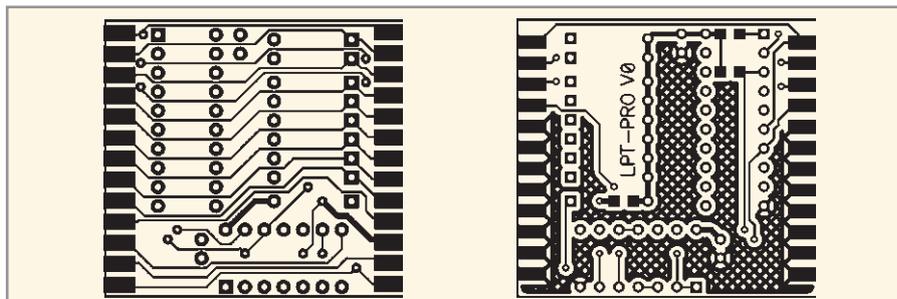


Рис. 2. Верхняя и нижняя стороны печатной платы

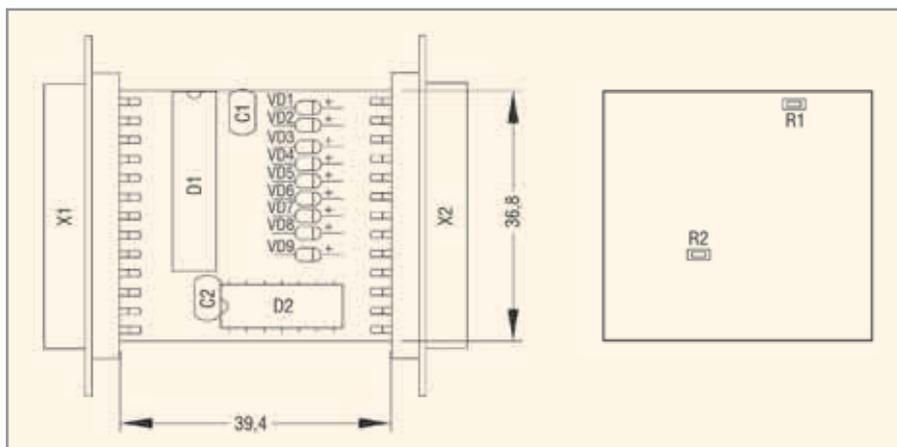


Рис. 3. Сборочный чертёж ключа LPT-PRO, вид сверху и снизу

```

;%%%%%%%%%%
;Подпрограмма обработки прерывания компаратора
;%%%%%%%%%%
ANA_COMP:nop
reti
;%%%%%%%%%%
;Подпрограмма обработки прерывания INT0
;%%%%%%%%%%
EXT_INT0:
sbis PIND,3 ;Если PD3=0, обращение к принтеру
reti
ldi Temp,0x02 ;Включение ключа
out DDRD,Temp ;Загрузка секретного слова
ldi Byte0,0x50 ;P
ldi Byte1,0x72 ;r
ldi Byte2,0x6F ;o
ldi Byte3,0x74 ;t
ldi Byte4,0x65 ;e
ldi Byte5,0x63 ;c
ldi Byte6,0x74 ;t
ldi Byte7,0x21 ;!
Main:
rcall Byte8Exchange
;Сюда можно вставить шифрование данных
sbis PIND,3 ;Если обращение к принтеру - спать
rjmp RESET
rjmp Main ;Переход на обмен данными

```

```

;=====
;Подпрограмма обмена 8 байтами данных
;=====
Byte8Exchange:
mov Byte,Byte0
rcall ByteExchange
mov Byte0,Byte
mov Byte,Byte1
rcall ByteExchange
mov Byte1,Byte
mov Byte,Byte2
rcall ByteExchange
mov Byte2,Byte
mov Byte,Byte3
rcall ByteExchange
mov Byte3,Byte
mov Byte,Byte4
rcall ByteExchange
mov Byte4,Byte
mov Byte,Byte5
rcall ByteExchange
mov Byte5,Byte
mov Byte,Byte6
rcall ByteExchange
mov Byte6,Byte
mov Byte,Byte7
rcall ByteExchange
mov Byte7,Byte
ret
;=====
;Подпрограмма обмена одним байтом данных
;=====

```

```

ByteExchange:
ldi Count,8
Loop8: sbrs Byte,7 ;Передать бит
      cbi PORTD,1
      sbrc Byte,7
      sbi PORTD,1
Wait1: sbis PIND,2 ;Ждать положительный фронт
      rjmp Wait1
      sec ;c=1 ;Принять бит
      sbis PIND,0
      clc ;c=0
      rol Byte
Wait0: sbic PIND,2 ;Ждать отрицательный фронт
      rjmp Wait0
      dec Count
      brne Loop8 ;Цикл на 8 бит
      ret
.EXIT

```

Как видно из текста данной программы, микроконтроллер после инициализации регистров и портов переходит в энергосберегающий режим с низким потреблением тока. Пробуждение его из этого режима происходит по прерыванию INT на входе D2 порта D. После чего производится программный опрос состояния сигналов, инициализация регистров обмена данными секретным ключевым словом и обмен данными с компьютером.

Программа транслируется любым подходящим транслятором, например AVR Studio, свободно распространяемым фирмой Atmel и доступным на сайте [www.atmel.ru](http://www.atmel.ru).

Перед установкой на плату микроконтроллера D1 он должен быть

запрограммирован. Можно установить на плату панельку на 20 контактов, в которую будет вставляться запрограммированный микроконтроллер D1.

Готовая прошивка для программирования микросхемы D1 в шестнадцатеричном формате приведена на рис. 4. Файлы `lpt-pro.bin` и `lpt-pro.hex` с прошивками микроконтроллера в бинарном и HEX-формате соответственно можно скачать с сайта журнала.

Программирование микросхемы необходимо производить на отдельном программаторе в параллельном режиме, поскольку только такой режим программирования позволяет установить режимы работы микроконтроллера с внутренней тактовой

## Новости мира News of the World Новости мира

### Новая технология имплантации позволяет считывать информацию на расстоянии до трёх метров

Zarlink Semiconductor сообщила, что в рамках проекта Healthy Aims European Union Framework VI начала исследования имплантируемой в тело человека антенны для систем Body Area Networks. Европейская программа Healthy Aims предусматривает разработку ряда медицинских имплантантов для пожилых людей и инвалидов. Имплантируемая в тело пациента радиометка может поддерживать связь с базовой станцией на расстоянии до трёх метров, что упрощает получение данных о состоянии пациента. Zarlink будет заниматься разработкой имплантируемой антенны и устройствами со сверхнизким потреблением.

Быстро развивающаяся область имплантируемой электроники требует проведения интенсивных исследований. Передача сигналов из имплантированного в тело человека устройства на внешний приёмник связана с решением ряда уникальных проблем, включая потребление, частоту, размер и биосовместимость. Антенны для беспроводных имплантированных медицинских устройств должны быть чрезвычайно небольшими по размерам и весьма эффективными, чтобы гарантировать, что потери сигнала при прохождении через человеческое тело были минимальными.

[www.zarlink.com](http://www.zarlink.com)

### Новая LiveAP-технология для домашних Wi-Fi сетей

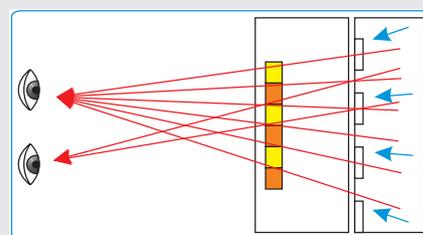
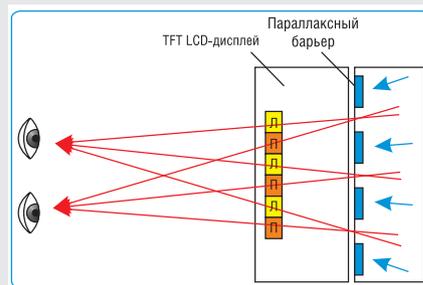
Компания Marvell предлагает новую технологию доступа для беспроводных домашних сетей – LiveAP™, которая поддерживает точки доступа AP (Access Point) в активном состоянии даже в том случае, если основное (хост) устройство – настольный PC, Media Center PC, игровая консоль или домашний трансивер – выключены. В большинстве современных технологий, в частности, Soft AP, хост-прибор должен быть включён для активизации точек доступа. Однако большинство пользователей выключают свои PC, что делает неработоспособной не только беспроводную домашнюю сеть, но и прекращает доступ в Интернет.

LiveAP снимает это ограничение, обеспечивая непрерывное функционирование AP независимо от того, в каком состоянии находится хост-прибор. Чрезвычайно малое потребление LiveAP позволяет использовать для их питания «standby» ток головного прибора. LiveAP поддерживает последние стандарты безопасности беспроводных сетей, такие как WPA, WPA2, и расширение AES стандарта 802.11i. Кроме того, LiveAP поддерживает спецификацию QoS (Quality of Service) нового стандарта IEEE 802.11e. Marvell продемонстрировала свою LiveAP-технологию на выставке Network+Interop Show, которая прошла в Las Vegas в мае этого года.

[www.marvell.com](http://www.marvell.com)

### Sharp предлагает дисплей с трёхмерным изображением

Sharp сообщает о разработке дисплея с трёхмерным изображением, воспринимать которое можно без специальных очков. Переключение из двумерного в трёхмерный режим работы производится активизацией специального параллаксного барьера на жидких кристаллах (см. рисунок сверху), расположенного позади TFT LCD-матрицы. Параллаксный барьер расщепляет световой поток таким образом, что левый и правый глаз наблюдателя воспринимает разное изображение. Если же параллаксный барьер выключить, разделение изображений для левого и правого глаза исчезает, и дисплей переключается в стандартный режим работы (см. рисунок снизу).



<http://sharp-world.com>

частотой 1 МГц. Для этих целей хорошо подходит программатор «Стерх», производимый в г. Бердск, или ему подобный.

Кроме самой программы необходимо запрограммировать оба бита защиты и бит установки режима работы от внутреннего генератора RCEN, который будет работать на частоте 1 МГц. На рис. 5 приведена копия экрана, поясняющая данные операции при программировании микроконтроллера на программаторе «Стерх».

После установки и распайки всех элементов на плату необходимо проверить схему на правильность монтажа и отсутствие замыканий. После этого ключ защиты можно подключить к компьютеру. При подключении ключа компьютер не надо выключать. Вся конструкция ключа помещается в стандартный корпус типа GC-25 для переходников с разъёмами DB-25. Для тестирования данного ключа автором была написана небольшая программа на языке Си. Текст этой программы приведен ниже.

#### Текст программы для тестирования ключа LPT-PRO

```

////////////////////////////////////
// Программа для lpt_pro проверяет наличие ключа защиты LPT
// Дата: 27/02/2004
// Версия: 1.0
////////////////////////////////////
Подключение библиотек
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <bios.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
// Описание функций
void CPU_On(void); // Разбудить процессор ключа
void CPU_Off(void); // Отключить процессор ключа
unsigned char Obmen(unsigned char); // Передать и принять байт ключа
unsigned char stp_2_y(unsigned char); // Возведение числа 2 в степень Y
// Описание переменных
#define BASE 0x378
////////////////////////////////////
// Начало программы
////////////////////////////////////
int main(void)
{

```

10000000	03	C0	15	C0	10	C0	11	C0	F8	94	F0	E0	F7	BB	F1	BB
10001000	FF	EF	F8	BB	F2	E7	F2	BB	F0	E4	FB	BF	F0	E3	F5	BF
10002000	78	94	88	95	FD	CF	00	00	18	95	00	00	18	95	83	9B
10003000	18	95	F2	E0	F1	BB	30	E5	42	E7	5F	E6	64	E7	75	E6
10005000	83	E6	94	E7	A1	E2	03	D0	83	9B	DE	CF	FC	CF	03	2F
10005000	17	D0	30	2F	04	2F	14	D0	40	2F	05	2F	11	D0	50	2F
10006000	06	2F	0E	D0	60	2F	07	2F	0B	D0	70	2F	08	2F	08	D0
10007000	80	2F	09	2F	05	D0	90	2F	0A	2F	02	D0	A0	2F	08	95
10008000	28	E0	07	FF	91	98	07	FD	91	9A	82	9B	FE	CF	08	94
10009000	80	9B	88	94	00	1F	82	99	FE	CF	2A	95	91	F7	08	95

Рис. 4. Прошивка для программирования микросхемы D1 в шестнадцатеричном формате

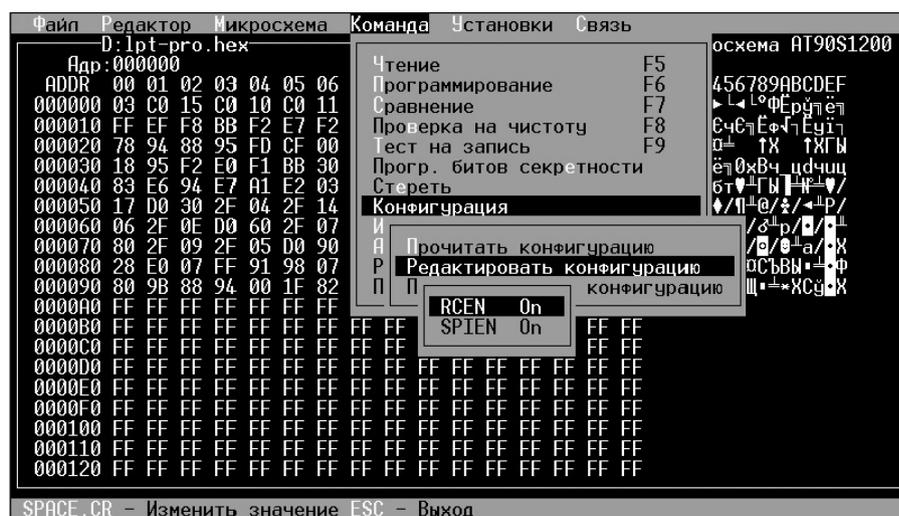


Рис. 5. Копия экрана при программировании микроконтроллера на программаторе «Стерх»

```

unsigned char c[8], i,
s[8]="Protect!";
m[8]={0x55,0xAA,0x00,0xFF,0x0F,0xF0,0x5A,0xA5};
clrscr(); // Очистить экран
CPU_On(); // Разбудить процессор ключа
printf("\nЭтап проверки 1:\n");
for(i=0;i<=7;i++)
c[i]=Obmen(stp_2_y(i));
// Передать и принять 8 байт, записанных в CPU ключа
printf("Считано: ");
for(i=0;i<=7;i++) printf("%c",c[i]);
for(i=0;i<=7;i++)
if(c[i] != s[i])
{CPU_Off(); printf("\nКлюч не обнаружен!\n"); return 1;}
printf("\nКлюч обнаружен\n");
printf("Записано:");
for(i=0;i<=7;i++) printf("%2.2X",stp_2_y(i));
printf("\n\nЭтап проверки 2:\n");
for(i=0;i<=7;i++)
c[i]=Obmen(m[i]);
printf("Считано: ");
for(i=0;i<=7;i++) printf("%2.2X",c[i]);
for(i=0;i<=7;i++)
if(c[i] != m[i])
{CPU_Off(); printf("\nОшибка записи-чтения байта %d\n",m[i]); return 3;}
printf("\nЭтап проверки 3 успешно завершён\n");
printf("Записано:");
for(i=0;i<=7;i++) printf("%2.2X",i);
printf("\n");
CPU_Off(); // Отключение питания ключа
printf("\nКлюч защиты обнаружен и проверен");
printf("\nРазрешено запускать основную программу\n");
return 0;
}

```

```

{CPU_Off(); printf("\nОшибка записи-чтения байта %d\n",i); return 2;}
printf("\nЭтап проверки 2 успешно завершён\n");
printf("Записано:");
for(i=0;i<=7;i++) printf("%2.2X",m[i]);
printf("\n\nЭтап проверки 3:\n");
for(i=0;i<=7;i++) c[i]=Obmen(i);
printf("Считано: ");
for(i=0;i<=7;i++) printf("%2.2X",c[i]);
for(i=0;i<=7;i++)
if(c[i] != m[i])
{CPU_Off(); printf("\nОшибка записи-чтения байта %d\n",m[i]); return 3;}
printf("\nЭтап проверки 3 успешно завершён\n");
printf("Записано:");
for(i=0;i<=7;i++) printf("%2.2X",i);
printf("\n");
CPU_Off(); // Отключение питания ключа
printf("\nКлюч защиты обнаружен и проверен");
printf("\nРазрешено запускать основную программу\n");
return 0;
}

```

```

////////////////////////////////////
// Функция передачи и приёма
байта ключа защиты
////////////////////////////////////
unsigned char Obmen(unsigned
char Dat8Out)
{
    int i,j;
    long l;
    unsigned char Dat8Buf, Dat8Inp
= 0;
    Dat8Buf = Dat8Out;
    for (i=0; i<8; i++)
    {
        Dat8Inp = (Dat8Inp << 1) +
((inportb(BASE+1)&0x80)==0);
utportb(BASE+2,0x02|(((128&Dat8Bu
f)==0)));
        for (l=0; l<2000; l++);
outportb(BASE+2,0x00|(((128&Dat8B
uf)==0)));
        for (l=0; l<2000; l++);
outportb(BASE+2,0x02|(((128&Dat8B
uf)==0)));
        Dat8Buf = Dat8Buf << 1;
        for (l=0; l<2000; l++);
    }
    return Dat8Inp;
}
////////////////////////////////////
// Функция побудки процессора
ключа защиты
////////////////////////////////////
void CPU_On(void)
{
    int i;
    long l;
    for (i=0; i<64; i++)
    {
        outportb(BASE,0xFF);
        for (l=0; l<20000; l++);
        outportb(BASE+2,0x00);
        for (l=0; l<20000; l++);
        outportb(BASE+2,0x03);
        for (l=0; l<20000; l++);
    }
    delay(100);
}
////////////////////////////////////
// Функция отключения процессора
ключа защиты
////////////////////////////////////
void CPU_Off(void)
{
    int i,l;
    for (i=0; i<128; i++)
    {
        outportb(BASE+2,0x0B);
        for (l=0; l<2000; l++);
        outportb(BASE+2,0x08);
        for (l=0; l<2000; l++);
    }
}

```

```

}
////////////////////////////////////
// Функция возведения числа 2 в
степень Y
////////////////////////////////////
unsigned char stp_2_y(unsigned
char y)
{
    unsigned char zuc;
    double zd, xd = 2.0, yd;
    yd=y;
    zd=pow(xd, yd);
    zuc=zd;
    return zuc;
}

```

Процесс обнаружения ключа компьютером сводится к приёму восьми байт от ключа и сравнению их с секретным кодовым словом. Одновременно с чтением этих восьми байт компьютер передаёт ключу другие восемь байт, которые микроконтроллер ключа сохраняет в своих регистрах. На втором и третьем этапе проверки ключа компьютер вновь читает восемь байт информации от ключа и сравнивает их с данными, переданными ключу ранее. Если все этапы проверки компьютером электронного ключа завершаются успешно, ключ считается обнаруженным и проверенным и можно разрешать работу основной защищаемой программе. В противном случае программа должна прервать своё выполнение и пользователь не сможет запустить защищённую ключом программу.

Как видно из текста программы, в ней присутствуют небольшие функции обмена с ключом защиты и простой протокол анализа полученных данных. В качестве базового адреса порта LPT используется описатель BASE. В программе ему присвоено значение 0x378, являющееся базовым адресом порта LPT1. Для работы с портом LPT2 или LPT3 необходимо соответственно изменить значение описателя BASE.

Результат работы программы в случае успешного обнаружения ключа будет выглядеть следующим образом:

```

Этап проверки 1:
Считано: P r o t e c t !
Ключ обнаружен
Записано: 01 02 04 08 10 20 40 80
Этап проверки 2:
Считано: 01 02 04 08 10 20 40 80
Этап проверки 2 успешно завершён
Записано: 55 AA 00 FF 0F F0 5A A5

```

```

Этап проверки 3:
Считано: 55 AA 00 FF 0F F0 5A A5
Этап проверки 3 успешно завершён
Записано: 00 01 02 03 04 05 06 07
Ключ защиты обнаружен и проверен
Разрешено запускать основную
программу

```

В случае если ключ защиты не подключён к компьютеру, сообщение программы будет иметь вид:

```

Этап проверки 1:
Считано:
Ключ не обнаружен!

```

Фрагменты данной программы вставляются в исходный текст программы, защищаемой от пиратского копирования, после чего она транслируется и становится защищённой приведённым здесь ключом. Файл с исходным текстом программы и исполняемый файл также можно скачать с сайта редакции журнала.

Для применения данного ключа в целях надёжной защиты программного обеспечения нужно всего-навсего заменить секретное ключевое слово Protect! на любое другое. Эту же операцию необходимо проделать и в программе самого микроконтроллера D1. Кроме того, для повышения секретности ключа можно модифицировать обе программы, изменяя при этом количество слов, передаваемых и принимаемых компьютером и микроконтроллером ключа, вставляя специальные задержки и т.п. Можно также ввести секретную маску для предварительного искажения и последующего восстановления данных или вообще изменить протокол общения компьютера с ключом. Таким образом, открытая архитектура описанного здесь аппаратного ключа защиты не даёт повода считать, что секрет данного ключа может быть легко раскрыт взломщиками ворованных программ. Даже не изменяя алгоритма работы имеющегося программно-обеспечения, данный ключ имеет высокую степень защиты от пиратства. Таким образом, представленный здесь ключ обладает большой гибкостью и вполне может носить название аппаратно-программного ключа защиты.

## ЛИТЕРАТУРА

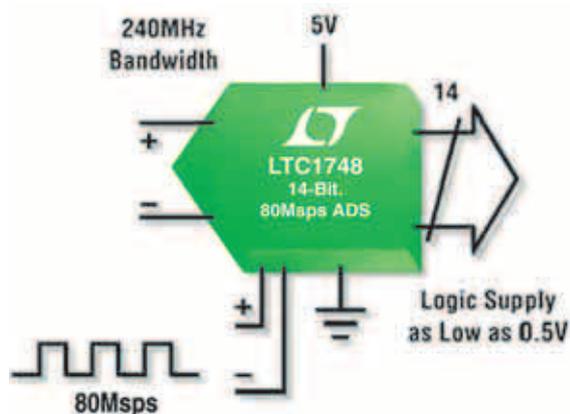
1. Вальна О. Тестирование LPT-порта. Схемотехника. 2003. № 1. С. 44.



# Новая серия ЦАП/АЦП — ЭКОНОМИЧНОСТЬ и БЫСТРОДЕЙСТВИЕ



## НОВЫЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



### ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Высокое быстродействие
- Большой динамический диапазон
- Биполярный дифференциальный вход
- Высокое отношение сигнал/шум
- Совместимость с 2 В/3 В/5 В/LVDS логическими интерфейсами
- Независимое питание выходных буферов 0,5...5 В
- Миниатюрный корпус TSSOP-48

Наименование	Разрядность	SNR, дБ	SFDR, дБ	$P_{\text{потр}}$ , Вт	Скорость, Msps
LTC1745	12	42,5	91	0,38	25
LTC1746	14	76,5	91	0,39	25
LTC1743	12	72,5	85	1,0	50
LTC1744	14	77	87	1,2	50
LTC1741	12	72	85	1,275	65
LTC1742	14	76,5	90	1,275	65
LTC1747	12	72	85	1,4	80
LTC1748	14	76,3	90	1,45	80

## НОВЫЕ 8-КАНАЛЬНЫЕ ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

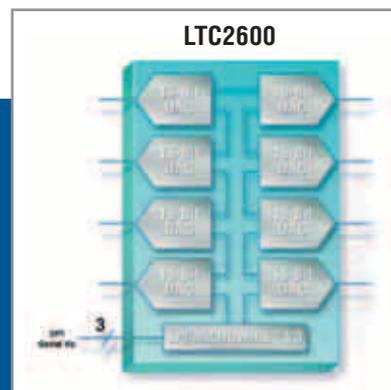
Наименование	Разрядность	$U_{\text{см}}$ , мВ	$t_{\text{уст}}$ , мкс	$I_{\text{потр}}$ , мА	$U_{\text{пит}}$ , В
LTC2600	16	$\pm 1$	10	2,5/канал	2,5...5,5
LTC2610	14	$\pm 1$	9	2,5/канал	2,5...5,5
LTC2620	12	$\pm 1$	7	2,5/канал	2,5...5,5

### Восьмиканальный ЦАП

Самая низкая стоимость канала преобразования

### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Телекоммуникационные системы
- Устройства распознавания образов
- Системы промышленной автоматики и управления
- Измерительная аппаратура
- Мобильная телефония и т.п.



# Охрана подворья на восемь объектов

Николай Заец (Белгородская обл.)

**Универсальное охранное устройство может быть с успехом использовано для охраны нескольких разнесённых объектов на дачном участке или фермерском хозяйстве, офисных и складских помещений и даже группы квартир в подъезде. Использование PIC-контроллеров позволило реализовать охранную систему в виде простой высоконадёжной конструкции.**

В актуальности темы охраны дворовых построек в наше время не приходится сомневаться. Трудно перечислить все публикации на тему охраны. Большинство из них посвящено охране гаражей, машин, квартир..., а охрана частного подворья или небольшого фермерского хозяйства освещена в печати недостаточно. Автор предлагает охранное устройство на PIC-микроконтроллерах для восьми объектов с восемью линиями охраны в каждом. Обмен информацией с охраняемыми объектами осуществляется по двухпроводной линии. Удаление охраняемых объектов зависит от сопротивления линии связи и может составлять не менее 100 м.

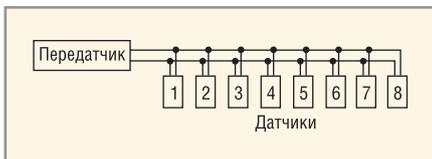


Рис. 1. Структурная схема охранного комплекса

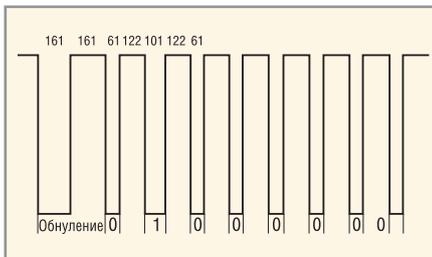


Рис. 2. Осциллограмма сигнала второго датчика

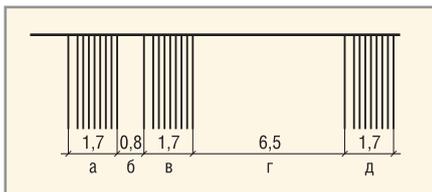


Рис. 3. Осциллограмма линии (мс)

(а) импульсы отклика с датчика, (б) пауза перед передачей кода датчика, (в) код номера следующего датчика, (г) время ожидания отклика с датчика, (д) код номера следующего датчика

Устройство можно использовать также для охраны офиса, рабочего или складского помещения, небольшого подъезда или лестничной площадки по договоренности с соседями.

Устройство охраны (рис. 1) состоит из передатчика, двухпроводной линии связи и 8 датчиков, которые включены параллельно. Передатчик и каждый датчик имеют отдельное сетевое и резервное питание. Схематически каждый датчик и передатчик построен на одном микроконтроллере типа PIC16F84A.

Обмен данными между передатчиком и датчиками аналогичен однопроводному интерфейсу фирмы Dallas Semiconductor и различается длительностью импульсов обнуления, нуля и единицы. Интерфейс предусматривает асинхронную передачу данных в 8-разрядном формате с привязкой данных к импульсу обнуления.

Передатчик последовательно выдает в линию пачку отрицательных импульсов, состоящую из импульса обнуления и восьми импульсов, содержащих позиционный код опрашиваемого датчика. Код датчика принимается всеми датчиками одновременно, но активизируется для ответа только тот датчик, номер которого совпадает с переданным кодом. После передачи кода датчика передатчик переходит на приём и ожидает отклика с датчика. Если линии охраны в датчике не разорваны, то он выдает в линию свой код. В противном случае код не выдётся, и передатчик, не дождавшись ответа, включает сигнал аварии и соответствующий светодиод. Таким образом последовательно опрашиваются все датчики. Номер датчика задаётся установкой перемычек на плате датчика. При обрыве линии связи с одним или группой датчиков на приёмник не поступают импульсы с этих датчиков, и

включаются соответствующие светодиоды и сигнал аварии.

При необходимости любой из объектов можно снять с охраны включением соответствующего тумблера.

Для примера рассмотрим пачку импульсов кода второго датчика (рис. 2). Каждая пачка импульсов начинается с импульса обнуления длительностью 161 машинный цикл микроконтроллера. При установке кварцевого резонатора на частоту 4 МГц длительность машинного цикла равна 1 мкс. При установке другого кварцевого резонатора все длительности импульсов изменятся в большую или меньшую сторону во столько раз, во сколько раз другой резонатор больше или меньше 4 МГц. Например, если установить кварцевый резонатор на частоту 1 МГц, то все длительности импульсов увеличатся в 4 раза, т.е. длительность импульса обнуления будет равна  $161 \times 4 = 644$  мкс. Далее все временные значения будут даны для резонатора частотой 4 МГц.

Следующим за импульсом обнуления выдётся импульс, соответствующий состоянию нулевого бита и равный «лог. 0» (61 мкс). Длительность паузы между импульсами битов равна 122 мкс. Длительность импульса, соответствующая состоянию первого бита, равна «лог. 1» (101 мкс). Длительность всех последующих импульсов будет соответствовать «лог. 0». При последовательном приёме импульсов, показанных на рис. 2, в регистр запишется двоичное число: 00000010, что соответствует второму датчику в позиционном коде. Пачки импульсов с передатчика и со второго датчика будут идентичны. Поэтому на осциллограмме линии (рис. 3) можно наблюдать одинаковые пары пачек импульсов с промежутком на время ожидания длительностью 0,8 мс.

Если на переданный код датчик не отвечает, то промежуток между пачками импульсов увеличится до 6,5 мс. Передатчик выдает в линию коды всех датчиков независимо от того, снят он с охраны или нет. Относительно большая разность между длительностями импульсов и пауз позволяет использовать в устройстве кварцевые резонато-

ры одного номинала без специальной подборки частоты и без всяких термостатических устройств. Устройство безотказно работало, когда при испытании один датчик помещался в морозильное отделение холодильника с температурой  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Для компарирования длительностей импульсов в микроконтроллере используется два прерывания – прерывание по изменению сигнала на входе RB0 и прерывание по переполнению таймера. По прерыванию на входе выполняется коммутация установок на прерывание по переходу уровня из высокого к низкому и наоборот. Это даёт возможность зафиксировать момент начала и окончания импульса. Если окончание импульса произошло раньше, чем произошло прерывание по переполнению таймера, то принятый импульс будет идентифицирован как «лог. 0». Если импульс обнуления не проходил по линии, то таймер устанавливается на фиксирование длительности импульса обнуления. Если импульс обнуления был, то таймер устанавливается на фиксирование длительности импульса «лог. 1».

Алгоритм работы программы передатчика показан на рис. 4. После пуска и инициализации регистров микроконтроллера в линию выдаются импульс обнуления и импульсы кода первого датчика. Переключается выход на вход и процессор ожидает импульса обнуления линии. Если импульс обнуления не приходит, то принимается «пустой» код. Если линия имеет короткое замыкание или обрыв, то «пустой» код содержит все единицы или нули соответственно. Если линия в порядке, а датчик не отвечает на запрос передатчика, то «пустой» код будет состоять из нулей. В этом случае при сравнении переданного кода с принятым кодом будет неравенство. Далее проверяется, выключен данный датчик потребителем или нет. Если датчик не снят с охраны, то включаются звуковой сигнал и светодиод с номером данного датчика. Если датчик снят с охраны, то увеличивается значение номера датчика, изменяется направление входа на выход и выполняется выдача в линию кода нового датчика.

Если у охраняемого объекта не разорваны линии охраны, то датчик выдаёт в линию связи свой код. При сравнении коды передатчика и датчика бу-

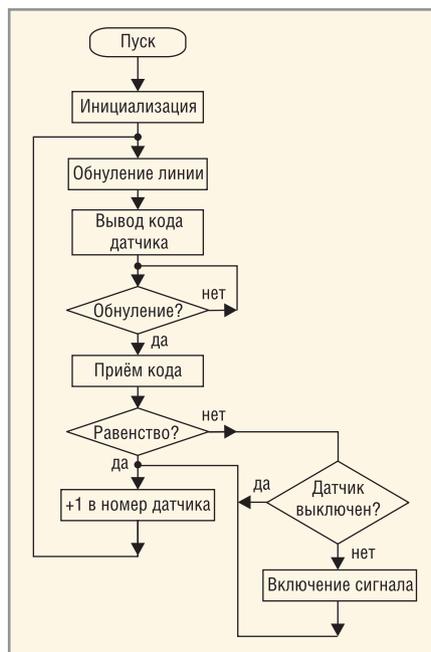


Рис. 4. Алгоритм работы программы передатчика

дут совпадать, и программа увеличит номер датчика, переключит направление входа на выход и перейдёт к выдаче в линию кода следующего датчика.

Алгоритм работы программы датчика показан на рис. 5. После пуска и инициализации регистров микроконтроллера считывается код номера датчика. Номер датчика устанавливается распайкой входов на плате в двоично-десятичном коде, поэтому считанный двоичный код перекодируется в позиционный код и записывается в регистр номера датчика. Проверяются датчики линий охраны, и ожидается импульс обнуления линии связи. После принятия импульса обнуления и кода с линии связи сравниваются принятый код и код датчика. Поскольку импульсы обнуления и коды передаются в линию связи, как передатчиком, так и каждым датчиком, то большинство принятых датчиком кодов не будут совпадать с его номером. В этих случаях программа вернётся к проверке целостности датчиков линий охраны и ожиданию нового импульса обнуления.

При совпадении принятого с линии связи кода с номером датчика проверяется флаг датчиков линий охраны. Если есть обрыв в линиях охраны, то программа снова возвращается к проверке датчиков линий охраны и ожиданию импульса обнуления без передачи своего кода. Если линии охраны не имеют обрыва, то производятся обнуление линии свя-

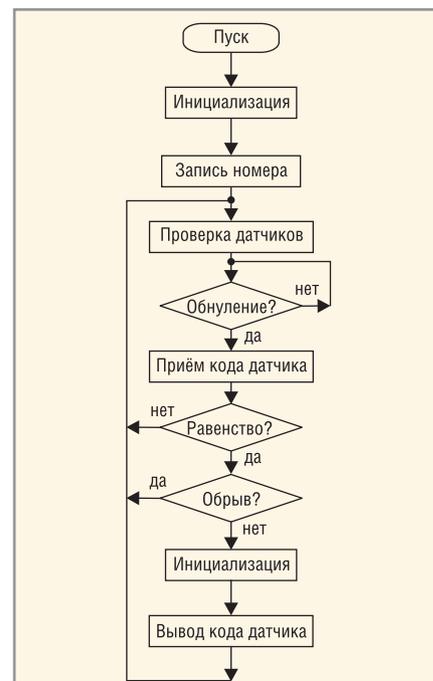
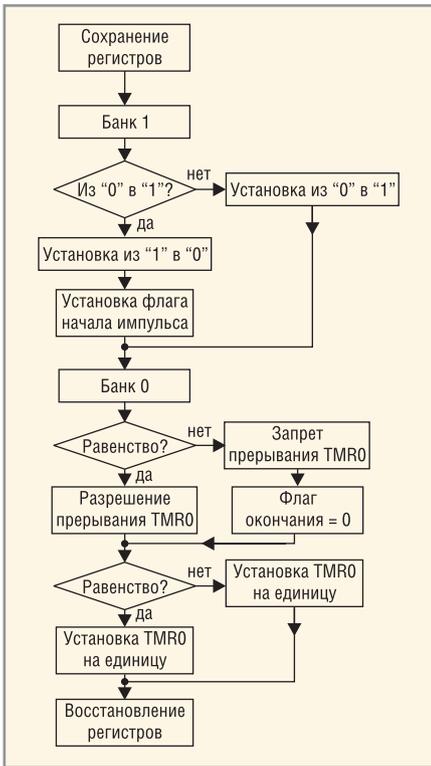


Рис. 5. Алгоритм работы программы датчика

зи и вывод кода номера датчика. После передачи кода программа возвращается к проверке целостности линий охраны. При обрыве любой линии охраны устанавливается флаг и включается сигнальный светодиод. Таким образом, проверка на обрыв датчиков линий охраны выполняется не реже, чем через 8,2 мс.

Основная работа по распознаванию принятых с линии импульсов выполняется при помощи прерываний. Прерывания разрешены во время ожидания импульса обнуления и приёма кода. Подпрограммы прерываний у передатчика и датчиков одинаковы, поэтому достаточно рассмотреть алгоритм работы одной подпрограммы прерывания по изменению входного сигнала на входе RB0 (рис. 6). Прерывание по входу может происходить при изменении сигнала либо из «лог. 1» в «лог. 0», либо наоборот. Выбор активного фронта внешнего прерывания с входа зависит от установки шестого бита регистра OPTION, находящегося в первом банке. Поэтому чтобы после прерывания по одному фронту импульса зафиксировать следующим прерыванием момент прохождения второго фронта импульса, необходимо изменить установку регистра OPTION.

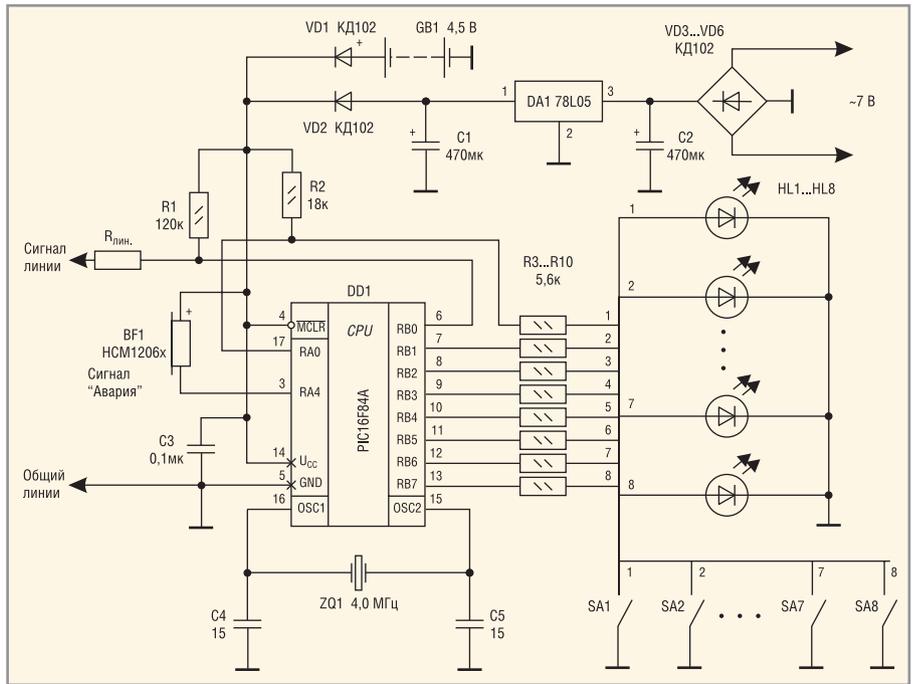
После сохранения значений рабочего регистра W и регистра STATUS программа переходит в банк 1. Далее проверяется, по какому переходу произошло настоящее прерывание и



**Рис. 6. Алгоритм работы подпрограммы прерывания по изменению входного сигнала на RВ0**

изменяется бит регистра OPTION. Если установлено следующее прерывание по переходу из «лог. 1» в «лог. 0», то устанавливается флаг начала импульса. Поскольку операции с регистрами общего назначения в первом банке не выполняются, то флаг устанавливается при помощи регистра косвенной адресации. После перехода в банк 0 по состоянию флага начала импульса запрещаются или разрешаются прерывания по переполнению таймера TMR0. При запрещении прерывания по переполнению таймера устанавливается флаг окончания импульса. По состоянию этого флага в подпрограмме приёма кода прекращается ожидание прерывания и записывается код бита.

Далее проверяется флаг обнуления, и если обнуления линии не было, то значение таймера устанавливается на фиксацию импульса обнуления. Если обнуление было, то таймер устанавливается на фиксацию единичного импульса. Если таймер не установлен, то прерывание по переполнению таймера произойдёт (с учётом установленного коэффициента деления предделителя, равного 2) через 512 машинных циклов. При установке таймера меньшим числом прерывание произойдёт позже (большее дополнение до 512) и зафикси-



**Рис. 7. Принципиальная схема передатчика**

руется более длительный импульс, чем при предустановке таймера прерывание восстанавливается значениями регистров W и STATUS.

Алгоритм работы подпрограммы прерывания по переполнению таймера прост и в иллюстрации не нуждается. После сохранения регистров проверяется установка флага обнуления. Если флаг не установлен, то устанавливается флаг единичного бита. Далее производится предустановка таймера на фиксирование единичного бита и восстановление регистров.

На рис. 7 показана схема передатчика. Вход RB0 микроконтроллера DD1 подключён к линии связи через сопротивление линии  $R_{лин}$  и «подтягивающий» резистор R1. Входы RA0 и RB1...RB7 используются для опроса состояния переключателей SA1...SA8 и включения светодиодов HL1...HL8. Включением переключателей SA1...SA8 снимают с охраны датчики с соответствующими номерами. Светодиоды HL1...HL8 сигнализируют об аварии датчика с соответствующим номером. Возникновение аварийной ситуации фиксируется звуковым сигналом BF1.

На рис. 8 показана схема датчика. Вход RB0 микроконтроллера DD1 подключён к линии связи через сопротивление линии  $R_{лин}$ . Входы RA0 и RB1...RB7 используются для опроса состояния датчиков охраняемых линий. Условно датчики охраны обо-

значены как переключатели без фиксации SB1...SB8. Светодиод HL1 сигнализирует об обрыве линии охраны. Входы RA1...RA3 используются для установки двоичного кода номера датчика.

Рисунки печатных плат передатчика и датчика показаны на рис. 9 и 10 соответственно, а расположение элементов – на рис. 11 и 12.

При изготовлении передатчика переключатели SA1...SA8 устанавливаются под соответствующими светодиодами HL1...HL8. Датчиками линий охраны могут служить концевые выключатели, герконы или тонкий медный провод типа ПЭВ-1 0,06. Необходимо только следить, чтобы сопротивление линии не превышало 3 кОм. В качестве резервного питания GB1 можно использовать три любых элемента по 1,5 В, но лучше взять батарею типа 3R12X напряжением 4,5 В. Потребляемый передатчиком ток с выключенными светодиодами равен 0,8 мА, а ток датчика 2,5 мА. Если охраняемые объекты находятся в одном помещении на небольшом расстоянии, то можно соединить все датчики третьим проводом, по которому подавать плюс напряжения питания. В этом случае и основное, и резервное напряжения питания будут централизованными. Вместо звукового излучателя HCM1206x можно использовать любой другой с встроенным внутренним генератором. Для более громкого сигнала тревоги потребуется усилитель

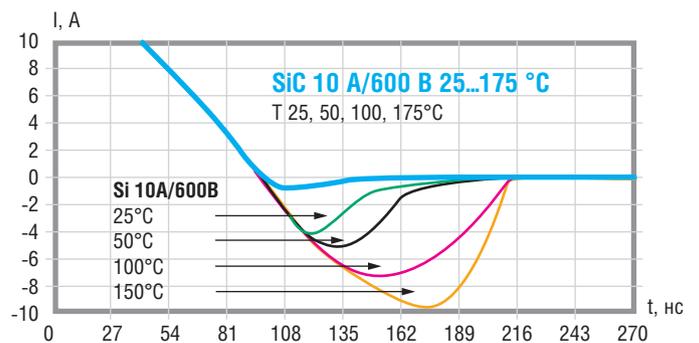
# Полупроводники НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ — будущее микроэлектроники



Первый в мире электронный диод

## ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Отсутствие эффекта обратного восстановления
- Низкая обратная ёмкость
- Сверхнизкие динамические потери, не зависящие от температуры и  $di/dt$
- Высокая рабочая температура кристалла
- Радиационная стойкость
- Положительный температурный коэффициент прямого падения напряжения



Форма тока через SiC-диод CSD10060 (Cree) и Si UFRD-диод DSEI12-06A (IXYS)

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДИОДОВ ШОТКИ ФИРМЫ CREE

Наименование	CSD04060A CSD04060D CSD04060E	CSD06060A CSD06060D CSD06060G	CSD10060A CSD10060D CSD10060E	CSD20060D	CSD05120A	CSD10120A CSD10120D	CSD20120D
$U_{\text{макс}}$ , В	600	600	600	600	1200	1200	1200
$I_{\text{пост}}$ , А	4	6	10	20	5	10	20
Типы корпусов	TO252, TO220-2, TO220-3	TO263, TO220-2, TO220-3	TO263, TO220-2, TO220-3	TO247-3	TO220-2	TO220-2, TO247-3	TO247-3

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Активные корректоры коэффициента мощности — снижение динамических потерь в ключевом транзисторе и диоде до 60%
- Антипараллельные диоды MOSFET- и IGBT-транзисторов и модулей для жёсткого переключения — снижение динамических потерь на 20...30%
- Мощные высоковольтные выпрямители до единиц мегагерц



Высоковольтные 300...1200 В ZeroRecovery™ диоды Шоттки на основе карбида кремния компании Cree

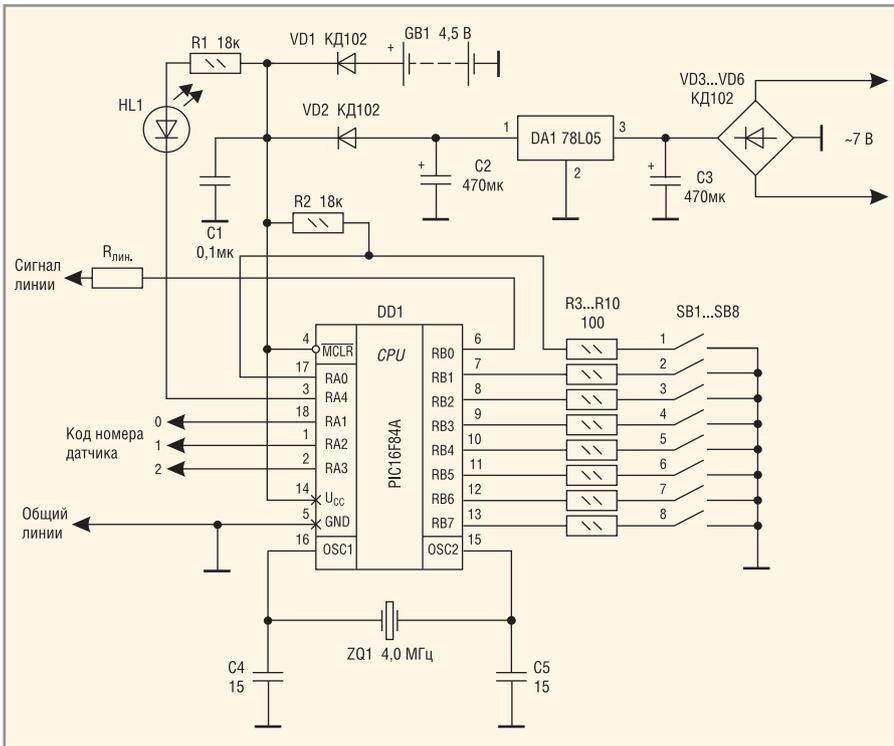


Рис. 8. Принципиальная схема датчика

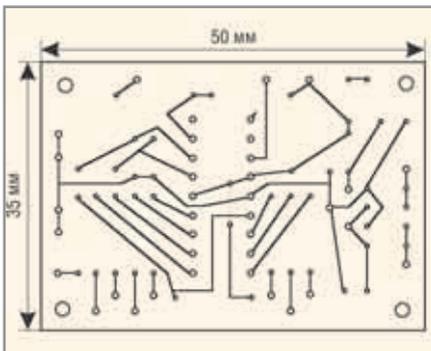


Рис. 9. Печатная плата передатчика

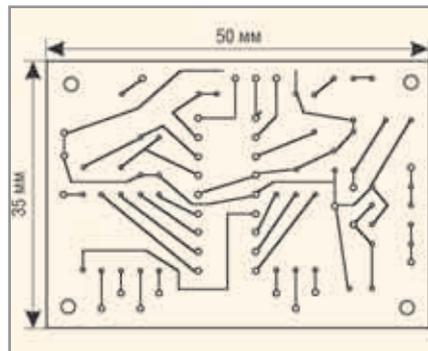


Рис. 10. Печатная плата датчика

мощности, работающий в режиме генератора с динамической головкой. В качестве индикаторов можно взять любые светодиоды повышенной яркости, желательно красного цвета.

Кварцевые резонаторы ZQ1 можно взять с любой частотой, но обязательно одинаковой для всех датчиков и

передатчика. Если частота резонатора меньше 200 кГц, то при программировании микроконтроллера необходимо изменить соответствующие биты регистра конфигурации.

Для налаживания устройства необходимо рассчитать или измерить сопротивление линии для каждого дат-

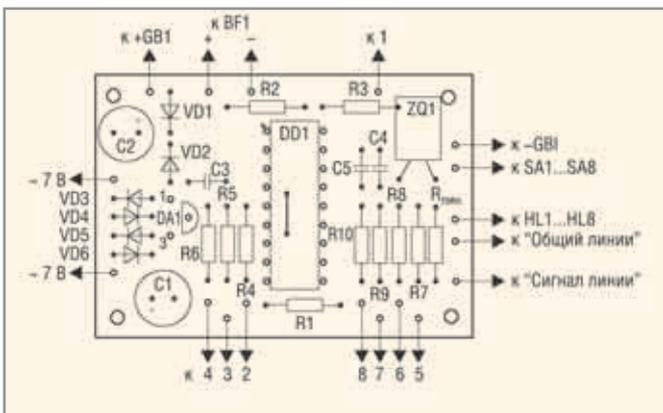


Рис. 11. Расположение элементов передатчика

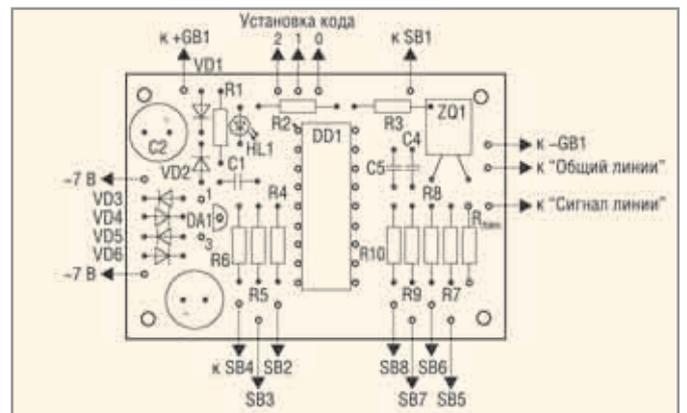


Рис. 12. Расположение элементов датчика

чика. Если длина линии связи не превышает 100 м, то сопротивления  $R_{\text{лин}}$  можно установить и в датчиках, и в приёмнике одинаковыми, равными 500 Ом. При большей длине линии связи сопротивление проводов можно рассчитать [1] по формуле:  $R = \rho l / S$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление меди, Ом мм<sup>2</sup>/м,  $S$  – площадь поперечного сечения провода, мм<sup>2</sup>,  $l$  – длина провода, м. Или, заменив площадь  $S$  диаметром провода  $d$ , мм, и подставив удельное сопротивление  $\rho$  (0,0175) для меди, получим:  $0,022l/d^2$ .

Максимальное сопротивление линии связи (определённое в «настольном» варианте макета) не должно превышать 3 кОм. Это сопротивление должно складываться из сопротивлений резисторов  $R_{\text{лин}}$  на плате приёмника и датчика и собственно сопротивления проводов. Установка сопротивлений линии  $R_{\text{лин}}$  на платах необходима для исключения взаимного влияния датчиков и приёмника. Это возможно в случае выхода из строя любого датчика или возникновения конфликтной ситуации в линии. Конфликтная ситуация может возникнуть, например, если неправильно распаяны коды номеров датчиков – два одинаковых номера у разных датчиков.

Испытание макета проводилось на линии связи, сделанной из телефонного провода с диаметром жилы 0,8 мм. Одновременно испытывалось четыре датчика (больше микроконтроллеров не было). Один датчик устанавливался на удалении 100 м, второй – 50 м, третий – 25 м, а четвёртый устанавливался в морозильное отделение (-20°C) трёхкамерного холодильника на расстоянии 10 м. У всех датчиков сопротивление  $R_{\text{лин}}$  было равно 500 Ом, а у приёмника 1 кОм. Интересно, что ис-

пытания проводились с микроконтроллерами коммерческого исполнения с гарантированной рабочей температурой 0...70°C. При установке датчиков в неотапливаемых помещениях лучше не рисковать и выбрать микроконтроллеры промышленного исполнения с гарантированной рабочей температурой -40...+85°C.

#### Подготовка к работе с устройством

К линии связи подключают необходимое число датчиков, равное числу охраняемых объектов. Если датчики подключают к линии связи при помощи пайки, то напряжение питания во всех остальных датчиках и приёмнике должно быть выключено. Если дат-

чики подключают при помощи зажимов, то выключать напряжение питания не нужно. На платах датчиков расплаивают код номера датчика. Не должно быть датчиков с одинаковыми номерами. Если число линий охраны меньше восьми, то свободные линии охраны подключают к минусу питания. Аналогично неиспользуемые номера датчиков в передатчике также подключают к минусу питания, что равносильно снятию их с охраны. После этого устройство готово к работе.

При возникновении аварийной ситуации во время работы устройства включается звуковой сигнал и светодиод с номером датчика. После

устранения аварийной ситуации в датчике необходимо снять с охраны данный датчик и снова включить его. После этого сигнал аварии выключится.

Файлы для программирования микроконтроллера передатчика (dvor3.hex) и для программирования датчика (vor3.hex) доступны на сайте журнала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Бастанов В.Г.* 300 практических советов. М.: Московский рабочий, 1993. С. 35, 36.
2. *Предко М.* Справочник по PIC-микроконтроллерам. М.: ДМК, ДОДЭКА, 2002. С. 276...281.



## Новости российских дистрибьюторов

### Повышающий DC/DC-преобразователь с выходным током 2 А в корпусе ThinSOT

Новый импульсный стабилизатор LT1935 компании Linear Technology – самый мощный из всех, выпускаемых в корпусе SOT-23. Входное напряжение стабилизатора 2,3...16 В, выходное до 40 В, максимальный выходной ток 2 А, рабочая частота постоянная 1,2 МГц, напряжение насыщения проходного ррп-транзистора 180 мВ при токе 2 А. Прибор может вырабатывать 5 В (1 А) при входном напряжении 3,3 В или 5 В (550 мА) при питании от четырёх щелочных элементов в SEPIC-схемах. LT1935 имеет схему мягкого старта, совместим по выводам с LT1930 и LT1613, выпускается в корпусе ThinSOT.

### Восемь 16-битовых ЦАП в одном корпусе

ЦАП LTC2601 компании Linear Technology – самый миниатюрный на рынке 16-битовых преобразователей. Прибор с потенциальным выходом, выпускается в 10-выводном корпусе DFN с размерами 3 × 3 мм. Управляется преобразователь по трём проводам через последовательный SPI-интерфейс. По сравнению с конкурирующими приборами, в ЦАП интегрировано больше функций и улучшена работа по постоянному току. Преобразователь оптимизирован под схемы цифровой калибровки, подстройки и установки уровня.

Выходной буфер LTC2601 питается напряжением 2,5...5,5 В, может работать на емкостную нагрузку до 1000 пФ, выходной ток до 15 мА, выходное напряжение практически от шины до шины, смещение выхода не более 9 мВ, установка выходного

напряжения на близком к нулевому уровню, уровень шума 15 мкВ в полосе 0,1...10 Гц, ток потребления в рабочем режиме 250 мкА, в дежурном 1 мкА. Предусмотрен вывод синхронизации для совместной работы нескольких ЦАП в системе, имеется схема сброса по питанию и вывод сброса синхронизации (asynchronous clear pin).

LTC2601 – один из приборов семейства компактных ЦАП Linear Technology. Два других преобразователя – LTC2611 и LTC2621 – совместимы по выводам с 14- и 12-битовыми ЦАП. Имеются наборы из 8, 4 и 2 ЦАП в одном корпусе.

### Сдвоенный DC/DC-преобразователь для лёгких нагрузок

LTC3737 – двухфазный двухканальный понижающий DC/DC-преобразователь с высоким КПД и малыми пульсациями при работе на лёгкие нагрузки. Прибор питается от одно- или двухсекционных литиевых аккумуляторов, обеспечивая минимальную разницу между входным и выходным напряжением соответственно 2,7 В и 2,5 В. Полный 100%- рабочий цикл, выходное напряжение, регулируемое от 0,6 В до входного уровня. Для контроля тока может быть подключён измерительный резистор или использован встроенный MOSFET VDS-датчик.

В LTC3737 применён р-канальный проходной MOSFET-транзистор. Высокая частота переключения 750 кГц позволяет применять миниатюрные внешние конденсаторы и катушки индуктивности. Возможны два режима работы: Burst Mode, при котором достигается максимальный КПД, и Pulse Skip – минимальные пульсации. Переключение происходит подачей соответствующего напряжения на вывод MODE. Возможно также

изменение частоты преобразования в пределах 300...750 кГц и её внешняя синхронизация при работе преобразователя в чувствительных к шумам схемах. Имеется схема мягкого старта и выход Power Good, показывающий, что выходное напряжение достигло заданного уровня. Рабочий диапазон температур -40...+85°C, корпус 24-выводной QFN. Область применения – блоки питания от двух Li-ion-аккумуляторов, системы распределённого питания, схемы питания FPGA или DSP с различными напряжениями для ядра и периферии.

### Экономичный 16-битовый 200-kpsps многоканальный АЦП

Linear Technology предлагает 16-битовый 8-канальный АЦП LTC1867 с производительностью 200 kpsps, в котором достигнут компромисс между потреблением и линейностью. Прибор потребляет 1,3 мА при полной нагрузке, обеспечивает нелинейность ±2 LSB INL. Преобразователь автоматически переходит в эконом-режим при малых скоростях, снижая потребление до 750 мкА при 100 kpsps и 200 мкА при 10 kpsps. LTC1867 обеспечивает 10-битовое преобразование без потери кодов во всём диапазоне рабочих температур.

Вход линейный или дифференциальный, униполярный (0...4,096 В) или двухполярный (±2,048 В). Корпус SSOP-16 совместим по выводам с семейством экономичных недорогих преобразователей. Имеется также 12-битовая версия LTC1863. LTC1867 и LTC1863 рассчитаны на применение в портативной аппаратуре, устройствах промышленной автоматике и в медицинской технике.

[www.prochip.ru](http://www.prochip.ru), тел. (095) 234-0636

# Программисту USB-устройств

## Часть 1. Знакомство с USB

Дмитрий Чекунов (г. Ижевск)

Интерфейс USB, несмотря на свою «молодость», уже прочно обосновался в компьютерной технике и стремительно заменяет все «классические» интерфейсы. Если несколько лет назад разрабатывать устройство с поддержкой USB считалось модным, то теперь это становится необходимостью. Только шина USB может обеспечить высокую скорость передачи данных, «горячее» подключение устройств и бесконфликтное распределение ресурсов системы. Цикл статей предназначен для программистов, приступающих к разработке «низкоуровневого» ПО USB-устройств. Предлагаемый материал даёт возможность самостоятельно спроектировать функциональную модель устройства, составить его описание и разработать ПО, обеспечивающее корректное подключение к шине. Материал будет также полезен разработчикам драйверов USB-устройств. В этой части статьи рассмотрены организация шины и устройств USB, логика работы хоста при обнаружении на шине нового устройства и возможные типы передачи данных.

### АРХИТЕКТУРА ШИНЫ USB

Топология шины USB очень похожа на дерево (рис. 1). В его корне находится ведущее устройство – хост, который осуществляет управление шиной. В задачи хоста входит: обнаружение подключения/отключения устройства, управление потоками данных, контроль статуса устройства, учёт статистики, распределение внутреннего питания между подключёнными устройствами. На шине всегда существует только один хост, поэтому направление передачи данных принято определять с его позиции. Если передача осуществляется от хоста к устройству, то поток имеет на-

правление OUT и называется downstream. При передаче от устройства к хосту поток имеет направление IN и называется upstream.

Устройства, подключаемые к шине, являются подчинёнными и делятся на два вида: хаб и устройство, выполняющее некоторую функцию. Хаб служит разветвителем шины и предоставляет свои порты для подключения других устройств, и хабов в том числе. Хост периодически запрашивает статус хаба и по его изменению определяет подключение нового устройства или отключение работавшего. Хаб, совмещённый с хостом, называется корневым. Функции, выполняемые корневым хабом и обычным, одинаковы.

Ветви, формируемые хабом, заканчиваются подключённым устройством, выполняющим определённую функцию. Часть портов хаба остаётся свободной, они запрещены до подключения нового устройства и на работу шины не влияют.

Подчинённые устройства не могут самостоятельно, спонтанно послать данные по шине, все операции выполняются ими только по требованию хоста. Однако, если хост перевёл устройство в режим пониженного потребления питания suspend, то при пробуждении от внешнего воздействия устройство сигнализирует об изменении своего статуса, не ожидая приглашения хоста.

Устройства могут использовать собственный источник питания или внутренний источник шины USB. Суммарный ток, потребляемый устройствами от источника шины USB, не должен превышать 1 А. Допускается подключение к шине до 127 подчинённых устройств.

На шине USB доступны три скоростных режима работы устройств: низкоскоростной, полноскоростной и высокоскоростной. В первую очередь скорость работы шины определяет хост, а уже при подключении устройство настраивается на доступную максимальную скорость. Наивысшая скорость передачи достигается при работе устройства на высокоскоростной шине.

### ОРГАНИЗАЦИЯ USB-УСТРОЙСТВА

Логическую организацию USB-устройства также удобно представить в виде дерева (рис. 2). Узлы ветвей (cfg, if, alt) обозначают режим работы. Окончание ветви (ep) – определённую функцию.

Выбор режима осуществляется указанием узлов нужной ветви. Установку и смену режима работы устройства выполняет хост. Режим остаётся активным до следующей команды смены режима работы. Функции, доступные в активном режиме, имеют

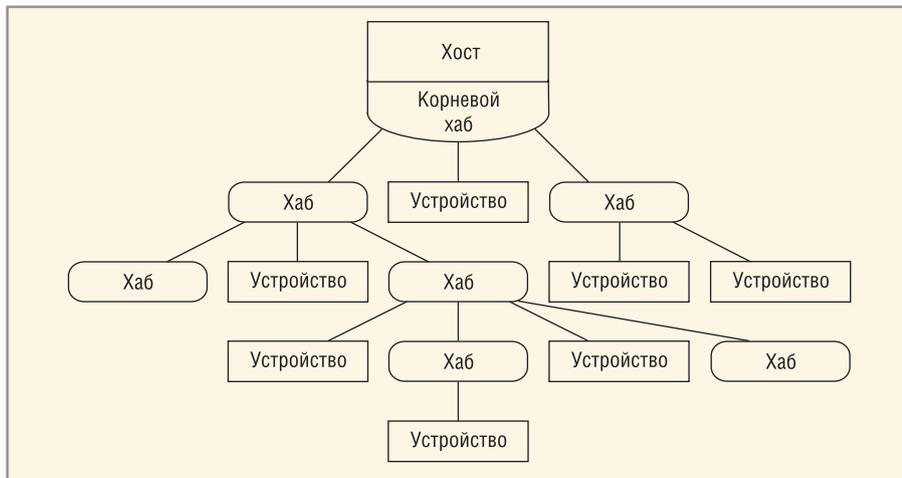


Рис. 1. Архитектура шины USB

уникальные адреса и называются точками. Выполнение соответствующей функции происходит при обращении хоста к точке устройства. Режим, в котором отсутствуют какие-либо функции, обычно используется для перевода устройства в нерабочее состояние, например idle.

Проектирование структуры USB-устройства, режимов работы и распределение функций выполняются программистом по собственному усмотрению. Далее, при подробном рассмотрении элементов логической структуры, распределим часть ресурсов устройства, представленного на рис. 2, для некоторого абстрактного программатора микросхем. На рисунке для конфигурации, интерфейса, альтернативной установки и точки сохранены английские обозначения, соответствующие сокращениям имён переменных, используемых при программировании.

Конфигурация (cfg) является первым элементом ветви и определяет глобальные настройки. Устройство может иметь от 1 до 255 конфигураций. Нумерация начинается с 1. Если номер активной конфигурации равен 0, то считается, что устройство не сконфигурировано и не способно выполнять никаких функций.

Например, конфигурация cfg1 (рис. 2) используется для перевода устройства в «спящий» режим, cfg2 – в режим программирования микросхем с последовательным интерфейсом, cfg3 – с параллельным.

Следующий элемент ветви – интерфейс (if). В продолжение конфигурации интерфейс позволяет разделить режимы по некоторым характерным особенностям в работе устройства. Нумерация интерфейсов начинается с 0, количество в одной конфигурации – от 1 до 256.

Конфигурация cfg2 (рис. 2), используемая для программирования последовательных микросхем, содержит N интерфейсов. Выделим интерфейс if0 для работы с микросхемами I2C, интерфейс if1 – для микросхем SPI, интерфейс if2 – для микросхем 1-Wire и т.д.

Альтернативная установка (alt) является последним элементом на ветви режима работы устройства. Он определяет количество доступных точек и специфические особенности при работе с ними. Нумерация альтернативных установок начинается с

0, допустимое количество в одном интерфейсе от 1 до 256.

В структуре устройства, представленного на рис. 2, ветвь cfg2–if0 выделена для работы с микросхемами I<sup>2</sup>C. Альтернативными установками alt0, alt1, alt2, ..., altN создадим подрежимы для работы с микросхемами соответствующего объема – 128 байт, 256 байт, 512 байт, ... 64 Кбайт.

Функции, выполняемые устройством в текущем режиме, определяются доступными точками. Точка (ep) – это буфер данных, при обслуживании которого устройство выполняет определённую функцию. Альтернативная установка может содержать до 15 точек направления OUT и до 15 точек направления IN. Каждая точка имеет свой адрес, который однозначно характеризует её направление передачи данных. Адреса точек OUT находятся в диапазоне 1...0Fh, это точки, в которые хост передаёт данные. Диапазон 81h...8Fh используется для адресов точек IN, из которых хост принимает данные. Нумерация точек одного направления может быть произвольной и не обязательно последовательной, т.е. следующий набор точек является правильным: 1, 3, 4, 8 (OUT) и 81h, 82h, 86h (IN).

При выборе ветви cfg2–if0–alt0 устройство переходит в режим работы с микросхемой I<sup>2</sup>C объёмом 128 байт. Для того чтобы запрограммировать микросхему, хост должен передать данные в точку ep1. При появлении данных в буфере точки устройство выполнит программу физической записи в микросхему I<sup>2</sup>C. Для чтения данных хосту достаточно обратиться к точке ep81, после чего устройство выполнит физическое чтение из микросхемы и разместит данные в буфер точки IN.

В структуре USB-устройства особняком стоит точка ep0 – это контрольная точка. Она является двунаправленной и доступна всегда, независимо от текущего режима работы устройства. Через контрольную точку осуществляется идентификация и конфигурирование устройства.

### Подключение и работа устройства

Как уже было сказано ранее, подключение устройства к шине USB происходит через порт хаба. Хост, периодически запрашивая статус хаба,

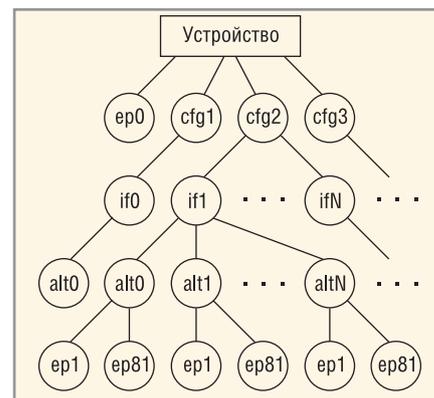


Рис. 2. Структура USB-устройства

узнаёт о подключении нового устройства и разрешает соответствующий порт. В этот момент устройство не имеет адреса и не сконфигурировано, поэтому хост обращается к нему по адресу 0 через контрольную точку (ep0). Первой командой (SET\_ADDRESS) хост присваивает устройству уникальный адрес, с которым оно работает до момента отключения. Далее, используя команду GET\_DESCRIPTOR, хост считывает описание устройства и описания всех конфигураций. Устройство всегда имеет как минимум одну конфигурацию. Хост командой SET\_CONFIGURATION устанавливает первую доступную конфигурацию, не анализируя её назначения. После этого устройство считается сконфигурированным и готовым к работе. Полученная информация позволяет операционной системе идентифицировать устройство и загрузить соответствующий драйвер. Дальнейшее управление устройством возлагается на драйвер.

Вернемся к рис. 2. После подключения устройство находится в конфигурации cfg1, и его полный рабочий режим лежит на ветви cfg1–if0–alt0. Для того чтобы пользователь смог запрограммировать микросхему с интерфейсом SPI объёмом 512 байт, необходимо выбрать новый режим, описываемый ветвью cfg2–if1–alt2. Драйвер командой SET\_CONFIGURATION с параметром 2 устанавливает конфигурацию для работы с последовательными микросхемами – cfg2, при этом активизируется продолжение ветви, определённое программистом по умолчанию, обычно if0–alt0. Следующая команда SET\_INTERFACE с параметрами 1 и 2 устанавливает необходимый режим работы – if1–alt2. В новом состоянии устрой-

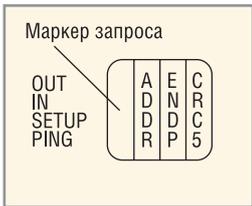


Рис. 3. Пакет запроса

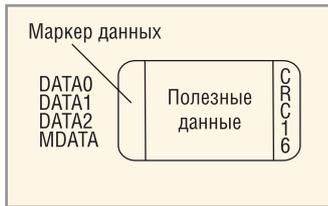


Рис. 4. Пакет данных



Рис. 5. Маркер подтверждения

ство имеет две (не считая контрольной) активные точки – ep1, ep81. Программирование микросхемы осуществляется передачей данных в точку ep1, чтение из микросхемы – запросом к точке ep81. Сменить обслуживаемый тип микросхем можно в любой момент. В случае если новая микросхема относится к семейству последовательных, драйверу достаточно выполнить команду SET\_INTERFACE с соответствующими параметрами.

Для возврата устройства в режим idle необходимо выполнить команду SET\_CONFIGURATION с параметром 1.

**СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА**

На шине USB используется пакетная передача информации. Для обмена одним пакетом данных хост и точка устройства выполняют цикл, представляющий последовательность «запрос–данные–подтверждение». Служебная информация, сопровождающая полезные данные, однозначно определяет адресата, целостность данных и готовность точки к следующему циклу.

Всю информацию, передаваемую по шине USB, можно разделить на следующие типы:

- пакеты запроса;
- пакеты данных;
- маркеры подтверждения;
- прочие пакеты.

Пакет запроса – это пакет служебной информации. Хост посылает запрос перед обменом данными или для проверки готовности точки. Пакет запроса (рис. 3) состоит из идентификатора пакета (маркер запроса), адреса устройства ADDR, адреса точки ENDP и контрольной суммы CRC5. Запросы, доступные хосту, имеют следующее назначение:

- OUT – хост начинает передачу данных точке ENDP устройства ADDR;
- IN – хост ожидает данные из точки ENDP устройства ADDR;
- SETUP – хост начинает контрольную передачу для точки ENDP устройства ADDR;
- PING – хост проверяет готовность точки ENDP устройства ADDR. Данный запрос доступен на высокоскоростной шине для передачи BULK и обращён к точкам с направлением OUT.

Пакет данных всегда передаётся вслед за запросом. В состав пакета (рис. 4) входят идентификатор (маркер данных), полезные данные и контрольная сумма CRC16. На размер пакета данных накладывают ограничения тип передачи данных и режим работы шины USB. Существуют следующие маркеры данных:

- DATA0 – чётный пакет данных;
- DATA1 – нечётный пакет данных;
- DATA2, MDATA – дополнительные маркеры, используемые при изохронном обмене на высокоскоростной шине.

Маркеры данных позволяют не только идентифицировать пакет, но ещё и контролировать целостность потока за счёт их определённой последовательности.

Маркеры подтверждения (рис. 5) предназначены для сообщения о результатах получения данных и состоянии точки устройства. Маркеры несут следующую информацию:

- ACK – данные получены без ошибок и будут обработаны;
- NAK – для точки OUT – данные получены без ошибок, но нет возможности их обработать, и поэтому требуется повторная передача данных. Для точки IN – данные не готовы, хост может повторить запрос позднее;



Рис. 6. BULK передача данных

- STALL – точка находится в состоянии HALT и не может выполнять свои функции без вмешательства хоста. Хост не должен повторять запрос;
- NYET – данные получены без ошибок и будут обработаны. Следующий пакет точка принять не готова. Данный маркер имеет место на высокоскоростной шине для передачи BULK и используется точками OUT. К прочим пакетам относятся SOF, PRE, ERR, SPLIT. Для программиста представляет интерес пакет SOF. Данный пакет используется для синхронизации и передается хостом с определённым интервалом времени.

**ТИПЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

На шине USB существует четыре типа передачи данных. Они отличаются передаваемым объёмом данных, приоритетом доставки и системой контроля и устранения ошибок.

Наиболее часто используемый тип – BULK. Для подобной передачи гарантирована доставка данных без ошибок, при этом время доставки не гарантировано и зависит от загрузки шины. Контроль данных осуществляется на уровне пакета – суммой CRC16 – и на уровне потока, где чётный и нечётный пакет имеют соответствующие маркеры – DATA0, DATA1. В случае обнаружения ошибки приёмная сторона не возвращает маркер подтверждения, тогда на передающей стороне запускается механизм автоматического повтора передачи.

Размер пакета данных может быть произвольным, в том числе и нулевым, но не должен превышать максимальное допустимое значение. Для высокоскоростной шины USB максимальное значение составляет 512 байт, для полноскоростной – 8, 16, 32 или 64 байта.

Типичная передача для полноскоростной шины показана на рис. 6. Хост в течение двух циклов передаёт данные устройству и получает подтверждение. В третьем цикле, после получения данных, устройство сообщает о невозможности обработать данные. В этом примере показано слабое место полноскоростной шины, где третий пакет данных потерян и требуется его

повторная передача, что увеличивает загрузку шины. На высокоскоростной шине данный недостаток устранён с помощью запроса PING

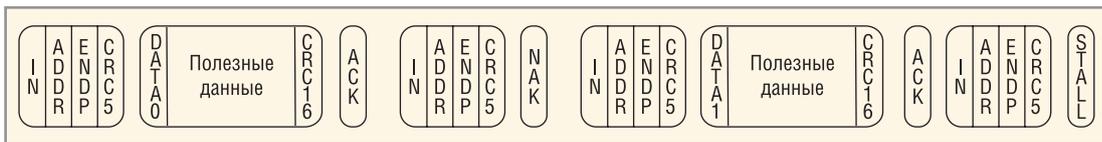


Рис. 7. BULK-приём данных

и подтверждения NYET. Для высокоскоростной шины после приёма второго пакета точка ответит подтверждением NYET. Это позволяет хосту приостановить передачу третьего пакета данных и контролировать её готовность коротким запросом PING. Продолжить передачу можно будет после получения подтверждения ACK.

BULK-приём представлен на рис. 7. Хост посылает запрос IN и подтверждает получение данных маркером ACK. Во втором цикле точка не готова передать данные, поэтому вместо пакета данных она посылает маркер NAK. После получения отказа хост повторяет запрос спустя некоторое время (цикл 3). Последний цикл заканчивается маркером STALL. Данный маркер посылает точка, не способная выполнять по каким-либо причинам свои функции; такое состояние точки называется HALT. В подобной ситуации для возобновления работы точки требуется вмешательство хоста. Точка, находящаяся в состоянии HALT, никак не влияет на работу других точек.

Второй тип передачи – INTERRUPT. Такой тип используется при необходимости обмена данными через заданный временной интервал. Хост гарантирует обмен с заданным интервалом и учитывает это при распределении загрузки шины.

Размер пакета данных для высокоскоростной шины имеет значение от 1 до 1024 байт, а для полноскоростной – от 1 до 64 байт. Интервал опроса точки также зависит от режима работы шины и находится в диапазоне 0,125...4 мс для высокоскоростного режима и 1...255 мс для полноскоростного.

Циклы обмена похожи на BULK-транзакции, представленные на рис. 6 и 7. Отсутствие данных для передачи из точки IN является штатной ситуацией, хост пошлёт следующий запрос по истечении заданного времени.

Следующий тип передачи – ISOSYNCHRONOUS. Передачи такого типа предназначены для быстрой доставки пакетов данных, при этом контроль целостности данных сводится к минимуму и ограничен наличием контрольной суммы CRC16. Повреж-

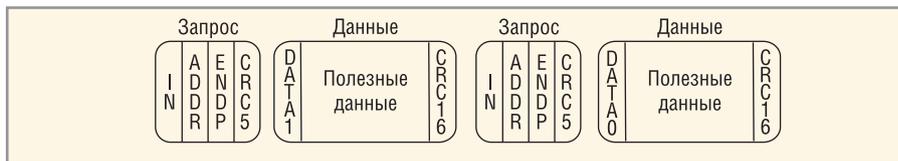


Рис. 8. Изохронный приём данных

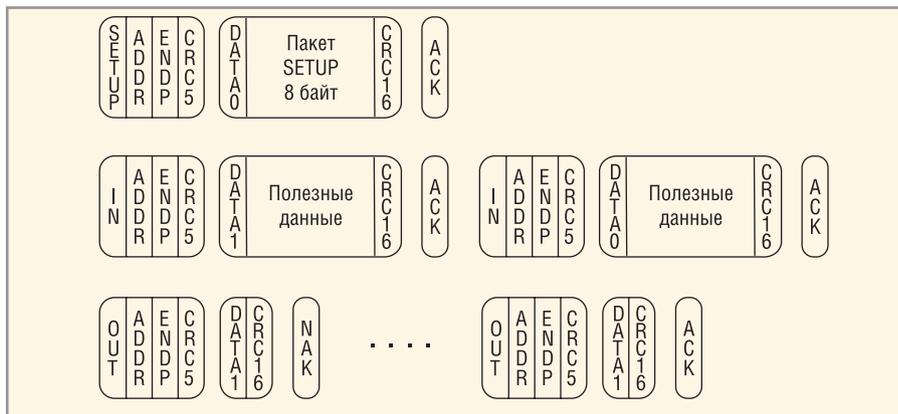


Рис. 9. Формат контрольной транзакции

дённый пакет уничтожается приёмной стороной, передающая сторона о возникновении ошибки не оповещается. Данный тип передачи используется для потоков видео- и аудиоданных.

Размер пакета данных на высокоскоростной шине достигает 1024 байт, на полноскоростной – 1023.

Типичный приём информации изохронного типа показан на рис. 8. Как можно увидеть из рисунка, в циклах обмена отсутствуют маркеры подтверждения.

Последний тип передачи данных – CONTROL. Данный тип передачи используется только при обращении к контрольной точке устройства. Полная транзакция контрольной передачи (рис. 9) состоит из трёх фаз. Первая фаза, показанная в верхней части рисунка, называется SETUP, во время этой фазы хост передаёт пакет данных размером 8 байт. Данный пакет содержит требование, которое должно выполнить устройство. Вторая фаза, изображённая в средней части рисунка, – фаза данных – является необязательной. Она присутствует в случае, когда для выполнения требования необходимы дополнительные данные. Структура потока в фазе данных полностью идентична BULK-транзакции. Послед-

няя фаза называется фазой статуса. Хост, ожидая подтверждения о выполнении требования устройством, посылает запросы. Направление запросов противоположно тем, которые использовались в фазе данных. При передаче запроса OUT хост посылает пакет данных нулевой длины. Пока устройство занято выполнением требования, оно отвечает маркером NAK, после успешного завершения – маркером ACK. Если устройство не способно выполнить требования или не поддерживает его, то в фазе данных или статуса необходимо вернуть маркер STALL.

Размер пакета данных на высокоскоростной шине составляет 64 байта, на полноскоростной – 64, 32, 16 или 8 байт.

Стандартные требования, используемые для управления устройством, передаются с помощью данного типа передачи. Программист при разработке USB-устройства должен обеспечить выполнение всех стандартных требований, а при необходимости может добавить собственные требования.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Universal Serial Bus Specification Revision 2.0. www.usb.org.
2. EZ-USB FX2 Technical Reference Manual. www.cypress.com.



# Схемная эмуляция: новая пропорция старого дуализма, или – паяем без паяльника

Сергей Ковалев (г. Киев, Украина)

Исходными данными предлагаемой автором системы компьютерного проектирования служит графический образ функциональной схемы прикладного алгоритма, выходными – его функционирование с соблюдением всей динамики происходящих процессов. Такой вещи, как компиляция, в этой системе просто нет места.

## Предисловие

Цель статьи – показать, что с помощью «обычной» программы схемной эмуляции можно решить множество проблем программирования. «Обычность» такой программы для меня, как для автора, состоит в том, что существует она с 1985 года, необычность – в том, что до сих пор не существует других программ, которые можно было бы отнести к классу программ схемной эмуляции.

Известны такие программы-симуляторы, как Micro-CAP от Spectrum SoftWare, PSpice от MicroSim Corp. и др., которые в советскую эпоху у нас принято было называть программами моделирования электронных устройств. Они работают в условной временной шкале, а не в режиме реального времени, и не предназначены для взаимодействия с внешними реальными электронными устройствами, да к тому же требуют ресурсов РС.

Что касается проблем, присутствующих в индустрии программирования, то можно с уверенностью сказать, что тема эта – бесконечна. Ей посвящено несчётное число статей в IT-литературе и во Всемирной паутине.

Именно растущее число проблем со стороны современного инструментария программирования и самих программистов способствовали росту популярности альтернативных путей написания программ – в частности, развитию идей программирования, основанных на теории автоматов.

Статья ставит своей целью показать:

- почему эмуляция(!), да ещё и схемная(!), чем она отличается от обычных схемных симуляторов и чем

лучше привычной компиляции или интерпретации;

- что применение схемной эмуляции для эмуляции графических проектов является прекрасным дополнением к уже развиваемой идее «автоматного» программирования, в частности, даёт возможность использования её как визуализатора и позволяет обойтись без заключительного этапа – программирования;
- что авторская программа схемной эмуляции по своей сути есть Система Графического Программирования;
- что слово «схемный» несёт в себе гораздо большую смысловую нагрузку, чем понятие принципиальной схемы электронного устройства. Теперь это – графический рисунок проекта: схемы функциональной, схемы алгоритма, графа переходов, графа состояний и другого, что может ещё быть придумано человеком и нарисовано им на листе бумаги или дисплее;
- что эмуляция – это имитация аппаратной реализации алгоритма.

Возможность реализации алгоритмов аппаратным путем или программным способом на ПК была названа Э.Э. Клингманом дуализмом.

Предлагаемая к рассмотрению технология эмуляции позволяет вообще отказаться от процедуры программирования для ряда задач: автоматизации технологических процессов (АСУ ТП), экспертных систем, нейронных сетей, баз знаний и др.

Достаточно нарисовать в графическом редакторе графический рисунок проекта – и эмулируй его себе на

здоровье, имея, кстати, «под рукой» готовые временные диаграммы для целей отладки или поиска неисправности в периферийном оборудовании (например, при реализации задач АСУ ТП).

Э. Дейкстра писал: «Я знал, что программы могут очаровывать глубиной своего логического изящества, но мне постоянно приходилось убеждаться, что большинство из них появляются в виде, рассчитанном на механическое выполнение, и что они совершенно непригодны для человеческого восприятия...» [Дейкстра Э. Дисциплина программирования. М: Мир, 1979.]

Поэтому всё, что написано ниже, – стоит прочитать.

Думаю, что пример внедрения идеи в область АСУ ТП поможет полнее понять её суть.

Сразу уточню: алгоритм эмуляции реализован в программе, которая по разным причинам пока не получила коммерческого развития, поэтому использовался мною только в личных внедрениях. Видимо, отечественным внедренческим фирмам пока легче жить по принципу: там купил – здесь быстро перепродал. Не важно, какого качества, зато навар в кармане сразу.

## Кризис в программировании

Профи от программирования вообще-то не любят говорить о каком-то кризисе в своей отрасли, предпочитая ограничиваться обменом мнениями на форумах различных сайтов на темы вроде: о нестрогой проверке типов, частом использовании указателей и возможных последствиях этого, доступности компиляторов для различных платформ...

По их глубокому убеждению, всё это – временные проблемы, которые, конечно же, будут устранены, к примеру, с появлением новой версии соответствующего компилятора. Са-

мы «продвинутые» позволяют себе поднимать вопросы более глобального масштаба, высказываясь о недостатке самой парадигмы объектно-ориентированного программирования (ООП), предлагая переход к парадигме процессов. Другие критикуют процессы, называя всё это лишь подменой терминов. Кто-то верит в появление чуда – какой-нибудь новой CASE-системы, которая поднимет качество программирования и сроки разработки программного обеспечения на доселе невиданный уровень, позволяя при этом создавать сложнейшее программное обеспечение человеку, просто владеющему мышкой.

Мы пережили уже несколько революций в программировании, и каждый раз это преподносилось чуть ли не как панацея. Однако, как это было до сих пор, каждый новый инструмент приносил и новые недостатки, и новые дыры. Я выделю основные проблемы, которыми страдает программирование как отрасль.

*Первая* – это лавинообразный рост программного кода в программных продуктах, предлагаемых пользователю, связанный с ростом функциональной сложности как прикладных программ, так и самого инструментария. Всё больше усилий требуется от разработчика на написание и отладку кода, всё меньше сил и времени остаётся на проработку самой задачи, поиск ошибок и оптимизацию.

Известна история про то, как при испытаниях некоей полётной системы на море периодически происходил её сброс. После долгих разбирательств выяснилось, что при переходе уровня моря (уровня Мирового океана) происходила ошибка «деление на ноль». В другом случае перестала работать некая географическая система, когда её решили использовать на другой территории. Как выяснилось, ошибка была связана с переходом через широту 90°.

На заре компьютерной техники программы решали сравнительно несложные задачи, поэтому и были сравнительно невелики. Естественно, и в таких объёмах появлялись ошибки, но для их поиска не надо было перелопачивать мегатонны кода.

Согласно данным отчёта Национального института по стандартам и технологии, объём экономических потерь из-за ошибок в ПО в США достигает нескольких миллиардов дол-

ларов в год, что составляет около 1% национального валового внутреннего продукта (Research Triangle Institute, NIST Planning Report 02-3, May 2002).

*Вторая* – любая программа способна реагировать только на те события и их комбинацию, которые предусмотрел программист.

Вне зависимости от методов разработки у любой программы есть состояния, в каждый момент времени определяемые значениями всех её переменных. Тогда изменение значения одной из управляющих переменных будет означать изменение состояния программы, а число состояний программы будет определяться максимально возможным количеством комбинаций значений управляющих переменных, возникающим при её работе. Если предположить, что в программе используются только двоичные управляющие переменные (флаги), то в этом случае количество состояний будет стремиться к  $2^n$ . Поэтому нет никакой гарантии, что в процессе работы программы не возникнет неожиданное сочетание входных воздействий, вследствие чего программа перейдёт в непредусмотренное состояние. Такие состояния Фредерик Брукс назвал «невизуализированными». «Сложность служит причиной перечисления, а тем более понимания всех возможных состояний программы, а отсюда возникает её ненадёжность...» [Брукс Ф. Мифический человек-месяц, или как создаются программные системы. СПб.: Символ, 2000.]

В частности, изучение современных компьютерных игр показывает, что при высоком качестве графического и звукового оформления досадные «проколы» чаще всего встречаются там, где на помощь могло бы прийти явное выделение на этапе проектирования всех требуемых состояний программы.

Работа же с графическим отображением проекта, например АСУ ТП, одинаково понятным заказчику и технологу, позволяет достичь необходимой строгости за счёт использования единой и наглядной спецификации.

*Третья* – отсутствие единой спецификации проекта в цепочке «заказчик–технолог–программист». Результатом совместной работы заказчика с исполнителем (пусть это

будет технолог) является некий алгоритм, представленный в виде графического рисунка или словесного описания – что выступает основой документа, называемого техническим заданием, скрепляемого печатями организаций.

Программисту необходимо проделать неформальную операцию перевода этого документа в язык машинных кодов – программного продукта, предоставляемого заказчику.

В большинстве случаев переход от алгоритмизации к программированию представляет определённую проблему. Это объясняется тем, что обычно процесс алгоритмизации почти никогда не завершается тем, чем должно завершаться создание алгоритма в математическом смысле. По определению он должен однозначно выполняться любым вычислителем, а оканчивается лишь некоторой «картинкой», называемой алгоритмом. Именно эту картинку приходится додумывать программисту, чтобы представить её вычислителю на понятном ему языке – языке программных операторов.

Не существует пока формальных методов такого «перевода», каждый программист проделывает эту работу по-своему, в зависимости от интеллекта и знания языка программирования. Почему до сих пор и принято считать программирование искусством.

*Четвертая* – участие программиста в совместных проектах. В течение долгого времени программирование обращается за примерами организации производства к другим инженерным дисциплинам и, прежде всего, к проектированию электроники. Тем не менее, программирование, несмотря на свою массовость, остаётся искусством. На сегодняшний день все попытки полностью формализовать или автоматизировать процесс написания программ оказались несостоятельными. Поэтому затраты времени и средств, выделяемых на проект, находятся в прямой зависимости от способностей и амбиций программиста. Зачастую он остаётся единственным человеком, способным разобраться в своем творении, от которого в конечном счёте зависит судьба всего проекта.

*Пятая* – уровень развития современных инструментальных средств программирования. С сегодняшни-

ми, в общем-то, не такими уж и трудными задачами (управление базами данных, интернет-технологиями и проч.) программирование, как отрасль знаний, ещё справляется. Но вызывает абсолютное сомнение факт, что «интеллектуальный уровень» ныне существующего инструментария позволит решить задачи уже недалекого будущего. А именно, создание экспертных систем нового поколения, баз знаний, искусственного интеллекта и т.п.

Всё вышеперечисленное невольно приводит к мысли о неминуемом приближении кризиса программирования как отрасли.

### Возрождение автоматов

Заказчики и разработчики программного обеспечения всегда мечтали о том, чтобы программы работали так же надёжно, как электронные устройства. Отсюда и постоянное стремление заимствовать организацию разработок и проектирования, устоявшуюся в индустрии электроники, а также внедрение формальных методов в технологию программирования.

Поэтому вполне естественным выглядит стремление положить в основу технологии программирования алгоритм работы разрабатываемой системы. Задача эта актуальна и потому, что её решение позволит представителям различных профессиональных групп – Заказчик, Технолог, Программист – однозначно понимать друг друга.

Но что-то здесь не клеится. Тексты программ по-прежнему мало похожи на алгоритмы. В конечном счёте появляются два алгоритма: один на бумаге, для отчётности и документирования проектных решений, а второй – в листинге программы. По существу получается, что программа отображает то, как программист смог понять исходный алгоритм. В итоге он оказывается единственным держателем важнейшей логической информации. Но дело ещё и в том, что разные программисты пишут программы по-своему, в зависимости от интеллекта и знания языка программирования. Нечего уже и говорить про случаи, когда человек может просто уволиться в разгар проекта.

Здесь нелишним будет вспомнить, что ещё лет двадцать назад на какой-то стародавней конференции по

проблемам формализации спецификаций один из участников в пылу дискуссии заявил, что при наличии полной и строгой спецификации программировать уже не потребуются совсем – специальный транслятор сам преобразует спецификацию в готовую программу. Что он имел в виду? Современные CASE-системы? Скорее всего, те, которые ещё появятся. Только тогда они называться будут по-другому и построены будут, по моему глубокому убеждению, на других принципах, вроде экспертных систем. Такие системы должны быть умнее человека и даже группы людей, их создавших. А этого можно достичь, вероятно, только применяя методы обучения и накопления знаний предметной области. И только тогда с такой системой действительно сможет работать человек, просто владеющий мышкой.

А вот что касается сегодняшнего продвижения в направлении внедрения формальных методов проектирования для задач логического управления, то значительный вклад в решение обозначенных выше проблем уже проделан путем переноса достижений теории конечных автоматов на область программирования.

В начале 70-х Дуглас Росс, автор известной методологии IDEF0, утверждал, что 80 и даже 90% информатики будет в будущем основываться на этой теории. И хотя этого пока не наблюдается, всё же можно сказать, что конечные автоматы играют заметную роль в развитии компьютерных технологий. Они активно используются в реализации сетевых протоколов, системах сжатия информации, криптосистемах, компиляторах, операционных системах (UNIX). Иными словами, там, где требуется большая надёжность и где логика поведения чересчур сложна, чтобы программист смог реализовать её на одном лишь уровне здравого смысла.

Параллельно с развитием в Европе синхронного программирования в России развивается подход к разработке программного обеспечения, названный «автоматным программированием», которое можно рассматривать в качестве разновидности синхронного программирования. Предлагаемая концепция проектирования позволяет максимально подробно описывать процессы, которые необходимо автоматизировать, ис-

пользуя при этом понятный всем формальный язык конечных автоматов. Более того, предлагается чёткий и универсальный метод описания, единый для всех стадий проектирования.

В качестве языка спецификаций в этой технологии предлагается применять язык графов переходов дискретных устройств, соответствующий выбранному типу автомата (Мура, Мили). Такое «аппаратное» программирование называется SWITCH-технологией. Решение этой проблемы имеет особую важность в связи с большой ответственностью при управлении такими объектами, как ядерные или химические реакторы, системы управления летательными аппаратами, и зависит от наличия развитого математического аппарата теории автоматов.

### Почему эмуляция?

Для того чтобы программировать, используя SWITCH-технологию, надо владеть теорией конечных автоматов. Лично мне в своих внедрениях, построенных на идее схемной эмуляции (к примеру, 64-канальном «релейном» регуляторе температуры для террариумов по выращиванию змей и прочих гадов или 3-канальном «ПИД-регуляторе» плавильных печей для ювелиров) удобно было пользоваться функциональной схемой выдуманного мною устройства.

Зато всё это при полном отсутствии программиста! И никакого программирования!!! Вроде как – паяем без паяльника!

Я знаю людей, «цифровиков» по духу, которым проще всего было реализовать проект в спроектированном ими цифровом устройстве, спаянном из дорогих сердцу вентилях, триггеров, счётчиков, мультиплексоров и т.д. Доходило до того, что из импортного упаковочного автомата (second-hand) изымался микропроцессор и на его место устанавливалось такое цифровое произведение.

Надо поменять алгоритм работы – пожалуйста: плата на ходу модернизировалась. Но что самое невероятное – всё это делалось быстрее, чем сделал бы человек, разбирающийся в микропроцессорах. Но ещё невероятнее – всё работало как часики и ни разу не дало повода хозяину частного заводика по производству продуктов питания даже задуматься: а не

пригласить ли мне другого специалиста.

Пусть каждый пользуется тем методом, которым владеет. Единственное, что остается неизменным в случае использования технологии эмуляции – наличие самой программы схемной эмуляции и графического рисунка проекта: схемы принципиальной, функциональной, алгоритма функционирования, графа переходов... Но насколько облегчилась бы жизнь этого любителя «цифр», окажись в его распоряжении технология эмуляции. Даже паять не надо было бы и бегать в поисках микросхем.

А теперь о том, что мне не понравилось во всякого рода автоматном программировании.

Во-первых, область применения ограничена программированием задач логического управления, т.е. ситуациями, где есть «1» или «0» («да» или «нет»).

Это – область, традиционно занимаемая обычными PLC-контроллерами.

В большинстве же задач автоматизации – всякого рода регуляторах – присутствуют аналоговые величины. Это могут быть уровни сигналов от датчиков, уровни управляющих напряжений, подаваемых на исполнительные устройства, географические координаты в геодезической системе, и т.д., и т.п.

Во-вторых, не подлежит сомнению прогрессивность идеи внедрения в практику программирования формальных (автоматных) методов, но моя душа восстает против того, что, составив алгоритм управления и обливаясь потом, нарисовав по нему граф переходов, я должен... взять клавиатуру в руки и ещё набрать по нему текст SWITCH-программы на Си или Паскале. Потому что, насколько мне удалось понять мировую «автоматную» мысль, программ, автоматически генерирующих программный код по графам переходов, пока нет.

Но даже если бы и были! Опять возвращение к пресловутым программным кодам???

Вы спросите меня, почему я так не люблю программные коды? Пожалуй, напомню:

- программирование – самый длительный и сложный этап выполнения любого проекта, а сам факт участия программиста в проекте

следует рассматривать как вредный и нежелательный;

- только графический рисунок может являться наиболее полной единой спецификацией проекта, понятной всем в цепочке: заказчик – технолог – проектант системы (раньше был программист);
- принципы организации алгоритма управления (рисунка проекта) и его программной модели не совпадают, другими словами, программа, написанная по графу, и сам граф неизоморфны. Получается, что нам предлагают использовать ещё один этап в общей цепочке проектирования, да ещё и такой, который может привносить ошибки. А ведь всюду в литературе, посвящённой вопросам «автоматного» программирования, подчеркивается актуальность его применения в особо ответственных областях, таких как ядерные реакторы, автопилоты и проч.;
- к достоинствам графических схем при их использовании в качестве языка алгоритмизации относится однозначность описания процессов, в том числе и параллельных, что теряется при переходе к текстам программ. Эта проблема вытекает из того, что функционально-поточная параллельная программа является графом, множество вершин операторов этой программы связаны между собой информационными связями. Разнообразие этих связей и их неструктурированность в потоковых моделях трудно поддается линейному представлению в виде текста. О параллельности здесь я вспомнил не зря, поскольку авторский алгоритм эмуляции по своей природе является системой, органично реализующей идею параллельных потоков и поэтому наилучшим образом приспособленной для эмуляции параллельных систем. А наиболее естественный способ отображения таких систем – графический;
- любая программа способна реагировать только на те события и их комбинацию, которые предусмотрел программист, на всё остальное программа будет реагировать неадекватно или не будет реагировать вообще. Этим, кстати, можно объяснить широкое развитие на Западе общественных движений, выступающих против применения

компьютеров в опасных технологических процессах, например, в атомной энергетике, ракетных системах стратегического назначения;

- давайте вспомним, что после того, как мы получили исходные коды, уже, возможно, содержащие неточности «перевода» (графическая схема – исходные коды программы), нам их ещё надо и откомпилировать, что также может стать источником ошибок в проекте. Компилятор сам по себе – штука сложная. Граф переходов или схема алгоритма функционирования проекта могут оказаться даже сложнее (пусть и меньшими по объёму). Транслятору же при обработке данных сложной структуры приходится для начала их правильно распознать, а затем вставить в машинный код множество дополнительных проверок, сформировать и обработать в памяти компьютера сложные объекты, что на уровне жёстко заданных машинных инструкций осуществить довольно трудно, а для сложных задач практически невозможно.

Но даже если мы прекрасно справились с задачей «перевода» графического рисунка проекта в исходные коды и нашли прекрасный компилятор, остаётся ещё один вопрос: а насколько вообще программирование способно точно отразить сложную динамику объектных реалий, нас окружающих?

Первые программы были абсолютно линейны, начинались со слова begin и заканчивались словом end. Это – подход «сверху-вниз»: программа начинается с первого оператора и заканчивается последним. Появление процедурно-ориентированного программирования изменило ситуацию настолько, что одной функции позволили временно прерывать другую, чтобы в это время точно так же линейно исполниться. Теперь программа начинается с первого оператора главной функции и заканчивается последним – той же главной функцией.

Эти базовые принципы кардинально не изменились и с появлением объектно-ориентированного программирования. Ну, свалили в одну упаковку данные и процедуры, а потом начали обёртывать этой «бумажкой» экземпляры коробок и использовать для доступа к содержимому

название коробки. Ведь почти то же самое можно сделать и с процедурой – записать в неё другие процедуры и данные.

Разбиение программы на объекты и процессы с заменой многоступенчатого ветвления средствами обработки сообщений (событий) заменяет одну проблему на другую: вложенность взаимодействующих компонентов заметно возрастает, а логика «размывается». Сегодня уже заговорили о недостатках объектов и достоинствах процессов – вместо ООП получилось ПОП. Такое положение вещей, как и подмена терминов, всегда сопутствовали программированию. Методологические надстройки – интересная штука – это такое надуманное творение, которое можно приспособить и к другим идеям. Достаточно заменить «объект» на «процесс», чтобы парадигму объектно-ориентированного программирования заменить на парадигму процессов...

К чему я всё это? Да к тому, что каким бы языком программирования ни пользовался программист, мы имеем на «выходе» один результат – исполняемый код управляющей программы со всем перечнем вложенных в неё статических состояний, которому под силу отреагировать только на достаточно статические внешние процессы. Электронные же устройства «не страдают» такими недостатками.

К сожалению, эти фундаментальные различия между «софтом» и «хардом» не поддаются какому-то вразумительному пониманию со стороны профессиональных программистов по одной простой причине: они не есть профессиональные электронщики.

В понятия «статический» и «динамический» они способны вложить что угодно: типы данных, указатели и прочее, но никак не динамические процессы, протекающие, например, в цифровом устройстве. Тут под динамичностью понимается не только сложная временная форма сигнала в отдельной цепи, но и временные соотношения сигналов в разных цепях, а также во всём устройстве.

Особую «пикантность» любому электронному устройству придают так называемые обратные связи, использование которых способно невероятно усложнить алгоритм его

работы. В распоряжении же программиста, переводящего алгоритм задачи на язык программных операторов (каким бы языком он ни пользовался), имеется утомительно однообразный инструментарий структурных операторов: арифметических, логических, конструкций условий и циклов... Однако любой компилятор будет «повергнут в шок», если функции начнут вызывать «за хвост» одна другую. А вот самый обычный RS-триггер, собранный на двух микросхемах «И-НЕ» с обратными связями, преспокойно себе работает не один десяток лет, даже не подозревая о трудностях, его поджидающих на программистской ниве.

Достаточно один раз попросить любого программиста составить программную модель даже несложной электронной схемы, чтобы раз и навсегда отбить у него охоту заниматься этим впредь. А вот любой самый посредственный электронщик, владеющий каким-нибудь схемным симулятором, легко выполнит это задание.

Программные симуляторы – то, что у нас в советскую эпоху называлось моделированием, – это особый класс программных продуктов, которые реализуют специальные алгоритмы построения программной модели реального устройства в памяти компьютера.

Моделированию предшествует этап прорисовки (составления) схемы из готовых «кубиков» – компонентов схемы. Непосредственно рисунок схемы, а также описание входных воздействий являются необходимыми исходными данными. Тем не менее, современные схемные симуляторы работают в условной временной шкале, а не в режиме реального времени, и требуют ресурсов современных компьютеров.

Естественно, что при этом нет даже смысла говорить о возможностях какой-то стыковки с внешним оборудованием, что ограничивает круг использования такого рода программным этапом анализа при схемотехническом проектировании. Поэтому моделирование можно рассматривать как начальный уровень эмуляции. Настоящая эмуляция – это возможность реализации принципа «черного ящика», когда, наблюдая систему снаружи, невозможно сказать: спрятано там внутри устройство управления, реализованное аппаратно, или там нахо-

дится РС, на котором имитируется его работа программным образом.

Алгоритм моделирования, изобретённый мною, совершенно оригинальный. Он абсолютно не похож на ранее и ныне известные и во всей полноте позволяет реализовать принцип «черного ящика». Реализован в программном продукте – «Схемный эмулятор «Пульс»» (авторское свидетельство ПА № 214 от 12.08.96 в Государственном Агентстве Украины по авторским и смежным правам). Во всей красе реализует принцип потока данных, обеспечивающий максимальный параллелизм. Рассчитан на эмуляцию аналого-цифровых устройств.

Конечно, каким совершенным ни был бы алгоритм, но попадая в среду фон-Неймана с её регистрами и одиозным счётчиком команд, он обречён на жалкую имитацию параллельных потоков. Тем не менее, даже в этих условиях программа работает в режиме реального времени в таких, например, приложениях, как эмуляция устройств автоматики в системах АСУ ТП. И не важно, что именно мы эмулируем: функциональную схему устройства, схему алгоритма работы или схему принципиальную.

Объём модуля эмуляции настолько мал (<100 кб), что вместе со скомпонованными библиотечными компонентами может разместиться в микропроцессоре для встраиваемых систем, но наиболее полно возможности программы могут раскрыться только при «аппаратной» реализации алгоритма на микросхемах программируемой логики.

Процесс разработки проектов в среде «Пульса» заключается в «сборке» в среде графического редактора графического рисунка из готовых «кубиков» – функциональных блоков. Каждому такому блоку могут соответствовать реальные узлы аналоговых и дискретных приборов: датчиков температуры, оборотов, давления, аналого-цифровых (цифро-аналоговых) преобразователей, релейных входов и выходов, а также функциональных блоков: компараторов, нормализаторов, ПИД-регуляторов и т.д.

Время разработки проекта определяется временем «сборки» рисунка проекта и соединения реальных «кубиков» в единый интерфейс.

Десятилетие прошлого столетия ознаменовали первую реальную

попытку превратить разработку программного обеспечения в инженерную дисциплину с помощью концепции CBSE (component-based software engineering – «компонентная разработка программного обеспечения») и COTS (commercial off-the-shelf – «готовые коммерчески доступные компоненты»).

Идея состояла в создании высококачественной системы объединения таких модулей, однако по сей день окончательно не решена. Проблема заключается в том, что объединенные вместе высококачественные модули не обязательно превращаются в высококачественную систему.

Комбинированная система может оказаться никуда не годной из-за некорректного способа объединения. Парадигма «разделяй и властвуй», которая оправдывает себя в случае аппаратных систем, может оказаться губительной для систем логических.

Идея схемной эмуляции выступает прекрасной демонстрацией единства математических основ аппаратуры и программного обеспечения.

Во Всемирной сети мне как-то попала рецензия Дмитрия Горилковского (Компьютерра. 2002. № 14. С. 59) на

книгу Шальто А.А. «Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов», из которой я приведу один абзац:

«Проведённая в книге аналогия между аппаратными и программными реализациями алгоритмов позволяет надеяться, что в недалёком будущем появятся программы, работающие столь же надёжно, как и современное «железо»».

Я думаю, что использование идеи схемной эмуляции как завершающего этапа автоматного проектирования можно рассматривать как весомый вклад в достижение этой цели. Теперь мы можем рассматривать любой проект так, будто он полностью реализован аппаратными средствами.

### АСУ ТП

В 2000 году я встретился с сотрудником института им. Е.О. Патона Дорошенко В.Д., ставшим впоследствии фанатом идеи эмуляции и автором всевозможного «железа». Он, как человек, активно занимающийся всякого рода внедрениями, к тому времени пришёл к пониманию того, что в борьбе за клиента победит тот, кто

первым научится реализовывать проекты быстро и с высочайшим качеством. А для этого надо иметь в своём арсенале готовые и тщательно отлаженные «кубики». И не дай Бог, чтобы в проекте участвовал программист – самый для него «ненавистный» человек, поскольку только от программиста можно было услышать что-либо вроде: «Я вчера не успел закончить программировать микропроцессор, потому что у жены был день рождения». Поэтому идея эмуляции «кубиков» была воспринята как естественное решение проблемы.

К слову сказать, тема проектирования систем автоматики и вообще АСУ ТП есть самая подходящая для идеи «игры в кубики». И понятно почему: относительно небыстрые процессы, которые можно отследить, расположив программу в компьютере или микропроцессоре для встраиваемых систем, разнообразие оборудования, распределённость в пространстве, актуальность сроков завершения и т.д.

Через несколько месяцев совместных поисков и трудов на свет появилось первое творение: в пластмассовый пыленепроницаемый промыш-

**PROSOFT**<sup>®</sup>

МОСКВА  
С.-ПЕТЕРБУРГ  
ЕКАТЕРИНБУРГ

Телефон: (095) 234-0636 • факс: (095) 234-0640 • E-mail: info@prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru  
Телефон: (812) 325-3790 • факс: (812) 325-3791 • E-mail: root@spb.prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru  
Телефон/факс: (343) 376-2820/2830 • E-mail: info@prosoft.ural.ru • Web: www.prosoft.ural.ru

ленный корпус была установлена материнская плата с Intel 386. Там же прекрасно разместился матричный жидкокристаллический индикатор VoluMin, заменив дисплей, и плёночный пульт управления. Жёсткий диск с программой и библиотекой компонентов был заменён флэш-диском. В другой слот была установлена плата стыковки ISA-I<sup>2</sup>C.

Интерфейс I<sup>2</sup>C (100 МГц) был выбран не в результате предвзятых мнений о преимуществах одного интерфейса над другими. Просто этот вариант оказался наиболее подходящим по соотношению цена–доступность–технологичность, а также из-за поддержки этого интерфейса ведущими мировыми производителями микросхем, такими, к примеру, как Atmel и Philips Semiconductors.

Кстати, как индикатор, так и пульт тоже имели встроенный интерфейс и наравне с периферийным оборудованием составляли библиотеку компонентов. Только соединялись в общую сеть «коротким» (двухпроводным) интерфейсом, в то время как все остальные внешние приборы были соединены по четырёхпроводной линии, позволявшей сделать её длиннее почти на два порядка.

На этапе отладки в ISA-слот можно было вставить видеокарту и наблюдать уровни сигналов во всех частях системы.

Разработка такого устройства преследовала цель – отработать идею «универсальной эмулирующей платформы» для АСУ ТП, чтобы затем перенести наработки на уровень микропроцессоров для встраиваемых систем и микросхем программируемой логики.

Это может быть символично, но идея составлять программы при помощи графического рисунка, вероятно, впервые была реализована именно в области автоматизации. Ныне на рынке предлагается огромный выбор подобных средств, я же остановлюсь на примере UltraLogik.

Ниже я попытаюсь коротко описать программу и порядок работы при составлении проекта. Это позволит человеку, внимательно читающему статью с самого начала, увидеть роль и место идеи эмуляции в контексте сравнения возможностей с существующим инструментарием.

Итак, программа состоит из двух компонентов: системы программи-

рования, работающей на PC-совместимом компьютере, и системы исполнения, работающей на целевом контроллере. Система программирования функционирует в операционной среде Windows. Программировать, конечно, можно просто на Си, Паскале или Ассемблере. Но можно программировать и в среде графического интерфейса, опираясь на возможности функциональных блок-овых диаграмм – FBD. Интерфейс позволяет описывать функции между входными и выходными переменными. Программы на языке FBD напоминают электрические принципиальные схемы логических устройств и формально соблюдают алгоритм их работы.

Однако на этом сходство заканчивается, поскольку такие схемы обязательно содержат метки, операторы условного и безусловного переходов. Система исполнения работает на открытом PC-совместимом контроллере серии ADAM или MicroPC (Octagon Systems) под управлением ROM-DOS. Это позволило применять PC-совместимые машины в области решения задач «жёсткого» реального времени, традиционно занимаемой «классическими» PLC.

Используя глобальные переменные, UltraLogik осуществляет сетевое взаимодействие между контроллерами и системой визуализации данных, которая устанавливается на обычном ПК (верхнего уровня). В роли системы верхнего уровня можно использовать любой SCADA-пакет, например, Genesis или Genie, используя для стыковки специальные DLL-модули. Система верхнего уровня служит для отображения процессов в объекте регулирования и не выполняет задач алгоритмического управления. Программы управления расположены непосредственно на контроллерах нижнего уровня, которые работают в непрерывном режиме.

Основные этапы создания программы в среде UltraLogik:

- заполнение таблиц глобальных переменных;
- конфигурирование контроллера;
- привязка переменных ко входам и выходам контроллера;
- разработка алгоритмов программ;
- компиляция;
- загрузка исполняемого кода в контроллер;
- отладка программы (!).

Но UltraLogik – это ещё «цветочки!» Практически все современные пакеты графического программирования – это SCADA-программы, требующие ресурсов мощных промышленных ПК, они не предназначены для работы на контроллерах нижнего уровня.

А теперь проведём сравнение возможностей программ визуального программирования на примере Ultra-Logik с возможностями схемной эмуляции.

Несмотря на декларативные заверения разработчиков средств визуального программирования о простоте и интуитивно понятном интерфейсе, такие системы по-прежнему достаточно сложны и требуют «ручной» работы: конфигурирования, привязки переменных и многого другого, что упускается в рекламных статьях.

В «Пульсе» «программирование» начинается и заканчивается прорисовкой графического рисунка проекта (сборка из готовых «кубиков»).

В современных системах графического программирования могут использоваться: языки функциональных блок-овых диаграмм (FBD) и последовательных функциональных блоков (SFC), язык релейных диаграмм (LD), язык структурированного текста (ST), язык инструкций (IL). Всё это достаточно «древние» языки, которые придумывались на заре программируемых логических контроллеров (PLC с закрытой архитектурой) для решения достаточно простых задач автоматизации логического управления. Сейчас прослеживается попытка приспособить их под новые платформы (промышленные компьютеры с открытой архитектурой) и новые, более сложные, задачи управления. Поэтому уверен, что к серьезным проектам, прежде всего, будет привлечён профессионал, владеющий Си.

«Пульс» позволяет работать с разнообразными схемами: принципиальными, функциональными, алгоритмов, графов. Нет необходимости пользоваться такими рудиментами, как метки и переменные. Данные передаются непосредственно по линиям связи, соединяющим «кубики». Это касается и организации мультиконтроллерных систем: если одним сложным агрегатом, входящим в технологическую линию, необходимо управлять с помощью нескольких контроллеров, то достаточно в каждом контроллере разместить соответ-

ствующий фрагмент общей функциональной схемы (рисунка проекта) для данного агрегата.

Программа эмуляции может быть размещена не только на PLC открытой архитектуры (PC-подобной машине), но и на обычном микропроцессоре для встраиваемых систем, например серии AVR, не говоря о более мощных современных кристаллах, что позволит использовать её в условиях более жёсткого режима реально-го времени и повышенных помех.

Наилучшим решением стала бы разработка универсального контроллера для встраиваемых систем на базе

микросхемы программируемой логики. Это будет эквивалентно «аппаратной» реализации алгоритма эмуляции, позволяющей достичь наивысшей скорости работы (в особенности для параллельных алгоритмов) и защиты от электрических помех.

Таким образом, здесь поднимается вопрос о возможности создания универсальных эмулирующих платформ трёх видов: PLC-PC, на встраиваемых микропроцессорах и на микросхемах программируемой логики.

За пользователем остаётся выбор оптимального варианта по своему усмотрению.

Первоначально общий алгоритм управления следует эмулировать на обычном ПК, используя монитор для отладки самого алгоритма, а затем перенести задачу на одну или несколько встраиваемых платформ.

Идею распределённого управления на встраиваемых эмулируемых платформах следует рассматривать как альтернативу централизованному управлению, реализованному на дорогостоящих промышленных компьютерах и серверах.

И никаких отладок программы, никакой компиляции и поиска ошибок! ☺

## Новости мира News of the World Новости мира

### 130 нанометров отправляются на пенсию

Компания Intel намерена постепенно свернуть производство процессоров, изготовленных с применением технологической нормы 130 нм. Официальных причин такого шага не называется, однако ясно, что процессорный гигант планирует освободить производственные мощности, для того чтобы увеличить количество процессоров, изготавливаемых с применением технологической нормы 90 нм. Сокращение затронет как модели, предназначенные для настольных систем, так и мобильные процессоры для ноутбуков. Первым делом пойдут на пенсию процессоры Pentium 4 2,80 ГГц, 3,06 ГГц и Pentium 4 3,20 ГГц с шиной 533 МГц. За ними последуют мобильные процессоры Mobile Pentium 4-M 2,20 ГГц, 2,40 ГГц, 2,50 ГГц и 2,60 ГГц. Та же судьба ждёт и бюджетные Mobile Celeron, с производства будут сняты модели с тактовыми частотами 2,20 ГГц, 2,40 ГГц и 2,50 ГГц. Наконец, компания намерена отказаться от дальнейшего изготовления процессоров Celeron M 1,20 ГГц и Pentium M 1,0 ГГц ULV. Таким образом, в общей сложности приговорены 13 процессоров, некогда считавшихся самыми передовыми.

[www.anandtech.com](http://www.anandtech.com)  
[www.computery.ru](http://www.computery.ru)

### Компания KDDI создала прототип топливного элемента

Японская компания KDDI, объединившись с Hitachi и Toshiba, создала прототип топливного элемента питания для мобильных устройств и настойчиво продвигается к созданию в 2007 г. его ком-

мерческого варианта. Заряда литий-ионных батарей современных мобильных телефонов в режиме просмотра цифрового телевидения (уже доступного в Японии) хватает на 2 часа. Топливный элемент, работающий на метаноле, удвоит это время.



[www.the-inquirer.com](http://www.the-inquirer.com)

### Прозрачный гибкий проводник на основе нанотрубок

Гибкое и прозрачное проводящее покрытие на основе углеродных нанотрубок не только ускорит создание гибких дисплеев и электронной бумаги, но и позволит заменить оксид оловяно-индиевого сплава. Учитывая потребность в прозрачных проводниках при производстве дисплеев, исследовательская компания Eikos разработала технологию создания прозрачных проводящих пленок с использованием углеродных нанотрубок. Прочное, гибкое, оптически нейтральное проводящее покрытие, названное Invisicon, позволит создавать гибкие дисплеи и фотогальванические фотоэлементы.

Технология использует преимущество в прочности, гибкости, цветовой нейтральности нанотрубок перед хрупкой и имеющей цветовую окраску оксидом индия. Нанотрубки смешиваются со связующим полимером, в результате чего получаются прозрачные проводящие чернила, которые затем наносятся на акриловую или стеклянную подложку.

Материал выдерживает растяжение до 18% и 25 тыс. циклов изгиба и скручивания с минимальными потерями проводимости. Сейчас технология позволяет создавать покрытия с удельным сопротивлением 200 Ом/квадрат, в 2005 г. предполагается достичь значения 50 Ом/квадрат.

[www.eikos.com](http://www.eikos.com)

### Полупроводниковые лазеры с изменяемой длиной волны

Японская фирма NTT разработала технологию полупроводниковых лазеров с изменяемой длиной волны, что ранее было возможно только для газовых лазеров. Технология использует оптически нелинейный кристалл ниобата лития для сложения двух лазерных лучей различных частот, в результате чего образуется луч с суммарной или разностной частотой. Технология позволяет генерировать лазерный луч с определённой фиксированной длиной волны в диапазоне от 500 нм до 5 мкм подбором толщины кристалла и длины волны лазера.

Лазеры, созданные по этой технологии, имеют выходную мощность 10...30 мВт и могут работать непрерывно при комнатной температуре.

[www.ntt.com](http://www.ntt.com)

## Уважаемые читатели!

**БЕСПЛАТНУЮ ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ** вы можете оформить, заполнив анкету на этой странице (ксерокопии принимаются) или на сайте журнала [www.soel.ru](http://www.soel.ru).

Фамилия, имя, отчество .....

Фирма .....

Должность .....

Телефон ( . . . ) .....

Факс ( . . . ) .....

E-mail .....

Сайт .....

### Адрес предприятия

Индекс .....

Город, район, область .....

Адрес .....

### Почтовый адрес для доставки журнала, если он отличается от адреса предприятия

Индекс .....

Город, район, область .....

Адрес .....

### Размер фирмы

- До 10 чел.
- 10...50 чел.
- 50...100 чел.
- Более 100 чел.
- Более 1000 чел.

### Сфера деятельности вашей фирмы

- Силовая электроника, импульсные источники питания
- Отображение информации
- Вычислительная техника
- Системная интеграция
- Промышленная автоматизация
- Связь, телекоммуникации
- Медицинская техника
- Охранные системы
- Бытовая электроника
- Производство печатных плат
- Контрактное производство
- Другое .....

### Ваши должностные обязанности

- Разработка
- Комплектация производства
- Организация производства
- Менеджмент
- Реклама, PR
- Руководство
- Другое .....

Компоненты каких фирм вы используете в работе .....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## Уважаемые рекламодатели!

Журнал «Современная электроника» имеет беспрецедентный для специализированного журнала тираж 15 000 экземпляров. Схема распространения журнала — по подписке, в розницу, через региональных распространителей, на семинарах и выставках, прямая рассылка ведущим компаниям стран СНГ — позволит вашей рекламе попасть в руки людей, принимающих решения о приобретении компонентов, приборов и оборудования, а также об организации производства изделий электроники.