Преобразователь напряжения в длительность импульса, стабилизированный ФАПЧ

Михаил Сизов (Москва)

В статье описана схема преобразователя напряжения в длительность импульса с применением фазово-импульсной модуляции и ФАПЧ, что обеспечивает высокую точность преобразования.

Введение

Для преобразования аналогового сигнала в импульсный сигнал постоянной частоты и переменной скважности применяется широтно-импульсная модуляция ШИМ [1]. Скважность это отношение периода следования импульса к его длительности. В предлагаемой статье рассматривается устройство, в котором длительность импульса Т_х модулируется входным напряжением U_x , причём частота следования импульсов F₁ остается фиксированной $(T_1 = 1/F_1)$. Работа простейшего преобразователя с ШИМ показана на рисунке 1, где входной сигнал $U_x = 0.3$ В преобразуется в выходной импульсный сигнал с длительностью импульса T_x = = 62 мкс. Период пилообразного напряжения Т₁ = 620 мкс, а амплитуда пилообразного напряжения $U_{\rm p}$ = 3 В.

Выходной сигнал генерируется аналоговым компаратором, на отрицательный вход которого подаётся опорный сигнал в виде пилообразного напряжения, а на положительный – модулируемый аналоговый сигнал U_x. Частота импульсов соответствует частоте зубцов пилы F_1 . В той части периода, когда входной сигнал выше опорного, на выходе получается лог. 1, ниже опорного – лог. 0. Данный тип ШИМ содержит минимальное число элементов, но обладает низкой точностью и стабильностью. Поэтому устройства, использующие принцип сравнения входного сигнала с пилообразным напряжением, не нашли широкого применения.

Известно, что можно повысить точность, если применить отрицательную обратную связь (ООС). Анализ систем, охваченных отрицательной обратной связью, осуществляется при помощи теории автоматического регулирования [2, 3]. На рисунке 2 показано устройство с обратной связью. Знак минус обозначает операцию вычитания части выходного сигнала из входного сигнала, K_y – коэффициент усиления устройства без ООС, K_{ooc} – коэффициент отрицательной обратной связи.

Коэффициент передачи устройства с ООС $U_{\text{вых}}/U_{x}$ = $K_{\text{п}}$ описывается выра-

жением $K_{\rm II} = K_{\rm y}/(1 + K_{\rm y}K_{\rm ooc})$ с учётом знака обратной связи. Произведение $K_{\rm y}K_{\rm ooc}$, пренебрегая единицей, называют глубиной ООС. Если $K_{\rm ooc} = 1$ (100-% обратная связь), а $K_{\rm y} >> 1$, то $K_{\rm II} = 1$, т.е. выходной сигнал повторяет входной сигнал. Таким образом, устройство с большим коэффициентом усиления, будучи охвачено 100-% ООС, сделает всё, чтобы устранить разность напряжений между входом и выходом.

Применение фазовой модуляции в качестве ШИМ

Фазовая модуляция (ФМ) является одним из видов модуляции колебаний, где фаза несущего колебания управляется информационным сигналом [4]. Из определения ФМ следует, что имеется генератор, у которого происходит изменение фазы выходного сигнала во времени. Этот вид модуляции используется в радиотехнике для передачи информации.

В статье предлагается рассмотреть схему с двумя генераторами, выходные сигналы которых (F_0 и F_1) имеют форму прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинуты по фазе. На рисунке 3 сигнал F_0 называется опорным, а сигнал F_1 имеет фазовый сдвиг относительно опорного сигнала, т.е. временной интервал



Рис. 1. Принцип работы ШИМ



Рис. 2. Блок-схема устройства с ООС



Рис. 3. Принцип работы импульсного ФД

между передними фронтами импульсов или моментами перехода импульсных сигналов из состояния лог. 0 в состояние лог. 1. Знак фазового сдвига считается положительным, если F_1 опережает по времени F_0 .

Простейшим устройством, преобразующим фазовый сдвиг в длительность импульса, является импульсный фазовый детектор (ФД), выполненный на двух D-триггерах (см. рис. 4). Выбор индексов 0 и 1 при обозначении частоты F связан с логикой работы ФД. Передний фронт сигнала F₁ устанавливает на выходе ФД уровень лог. 1, а сигнала F₀ – уровень лог. 0. Далее описывается устройство, которое преобразует входное напряжение U_x в фазовый сдвиг сигнала F_0 относительно F_1 , а на выходе ФД формируется импульсный сигнал с длительностью Т_х, пропорциональной U_x.

Для преобразования аналогового сигнала в фазовый сдвиг применим фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ), функциональная схема которой показана на рисунке 5. ФАПЧ – это система автоматического регулирования с ООС, подстраивающая частоту управляемого генератора F_0 так, чтобы она была равна частоте входного сигнала F₁. Выходной сигнал управляемого генератора сравнивается ФД с входным сигналом, а результат сравнения используется для подстройки управляемого генератора. В связи с тем, что настройка осуществляется по разности фаз, система является астатической по отношению к частоте, т.е. в установившемся режиме частота настройки точно равна частоте входного сигнала ($F_0 = F_1$), а фазовый сдвиг устанавливается таким, что выходное напряжение ФНЧ (U_{гун}) обеспечивает равенство частот. При определённых условиях, которые зависят от типа ФНЧ, система ФАПЧ может быть астатической и по фазе. Более подробное описание ФАПЧ можно найти в [5-7].

Широтно-импульсный преобразователь с ФАПЧ

Введём в стандартную схему ФАПЧ генератор G сигнала F_1 с фиксированной частотой и элемент сравнения входного напряжения U_x с выходным сигналом ФД на входе ФНЧ, и получим функциональную схему (см. рис. 6) фазово-импульсного модулятора (ФИМ) с ФАПЧ. В этом преобразователе исполь-



Рис. 4. Схема импульсного ФД



Рис. 5. Функциональная схема ФАПЧ

зуется ООС, и среднее значение входного сигнала U_x сравнивается с преобразованным в напряжение средним значением длительности импульса T_x за период частоты F_0 . Наличие ООС и большой коэффициент усиления ФНЧ обеспечивают высокую точность пре-

27



Рис. 6. Функциональная схема ШИМ с ФАПЧ



Рис. 7. Схема ФНЧ для отрицательных входных сигналов



Рис. 8. Схема ФНЧ для положительных входных сигналов

образования и позволяют снизить требования к точности и стабильности элементов схемы. Аппаратная реализация предлагаемой схемы ФИМ не является сложной. В настоящее время выпускаются различные ИС ФАПЧ. Например, микросхема CD4046 (К561ГГ1) содержит три варианта ФД, ГУН, источник опорного напряжения (ИОН) и дополнительные цепи управления ГУН. На рисунке 7 показана аппаратная реализация ФНЧ.

Фильтр НЧ выполнен по схеме пропорционально-интегриующего (ПИ) фильтра на ОУ, который сравнивает средние значения сигнала U_x и преобразованного в напряжение длительности импульса *Т_x* за период частоты F_0 . Резисторы R_1 и R_2 определяют масштабный коэффициент сравнения. Произведение R_1C_1 определяет постоянную времени интегратора фильтра, R3 обеспечивает устойчивость схемы ФИМ, а отношение R_3/R_1 определяет коэффициент передачи фильтра на переменном токе. Если ФД имеет выходную характеристику в области положительных напряжений, то входной сигнал должен иметь отрицательную полярность. Если входной сигнал положительный - следует использовать дифференциальную схему включения ОУ, приведённую на рисунке 8. Элементы схемы ФНЧ должны удовлетворять условию $R_3/R_1 = R_4/R_2$ и $R_1C_1 = R_2C_2$.

Выходной сигнал ФНЧ управляет генератором (ГУН) таким образом, чтобы частоты сигналов F_0 и F_1 были равными, а фазовый сдвиг между ними



Рис. 9. Схема преобразователя напряжения в длительность импульса

28

был таким, чтобы выполнялось равенство:

$$\frac{U_x}{R_2} = \frac{U_p}{R_1} \frac{T_x}{T_1},$$
 (1)

где $U_{\rm p}$ – амплитуда импульса (напряжение питания ФД).

Применение ПИ-фильтра делает систему ФАПЧ астатической по фазе. Это означает, что если $R_1 = R_2$, то установившееся значение относительной длительности выходных импульсов ФИМ (T_x/T_1) определяется только отношением U_x/U_p и не зависит от параметров других элементов схемы ФИМ, т.е.

$$U_x/U_p = T_x/T_1.$$
 (2)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ФИМ

На рисунке 9 показана электрическая схема ШИМ, в котором реализован принцип ФИМ. В схеме используются два элемента 2И-НЕ с тригтером Шмитта на входе (1/2 корпуса CD4093) ОУ (1/2 корпуса AD822AR) и микросхема ФАПЧ CD4046. Генератор сигнала частотой $F_1 = 10$ кГц выполнен на инверторе D1D и времязадающей цепочке R6C4; ФНЧ выполнен по схеме дифференциального ПИ-фильтра на микросхеме D3A; постоянная времени интегратора фильтра $T_{\mu} = R_1 C_1 = 100$ мкс; коэффициент пропорциональности фильтра $K_{\Pi} = R_3/R_1 = 1. \ \Phi \square$ и ГУН входят в состав микросхемы ФАПЧ D2. В микросхеме D2 выход ФД «р» (вывод 1) имеет инверсный уровень; чтобы изменить логику работы ФД, в схему введён инвертор на элементе D1А. Характеристики ФД и ГУН показаны на рисунках 10 и 11 соответственно.

Для расчёта динамических характеристик систем регулирования используется круговая частота (угловая частота) $\omega = 2\pi F$, рад/с. ГУН настроен таким образом, чтобы при напряжении $U_{\text{гун}} = 0$ В выходная частота $F_0 = F_1 = 10$ кГц, а при $U_{\text{гун}} = 10$ В выходная частота удваивалась $F_0 = 20$ кГц. Это сделано, чтобы оптимально использовать линейный диапазон выходного напряжения ФНЧ, который ограничен напряжением питания ОУ и равен ±15 В. Кратные 10 значения частот, периода и амплитуды выходных импульсов ФД выбраны для упрощения вычислений.

Для демонстрации работы преобразователя с ФИМ, с помощью программы Electronics Workbench 5.12 была создана электронная модель (Ux-Tx.ewb), которую можно загрузить с интернетстраницы журнала (www.soel.ru). Результаты моделирования и принципиальная схема модели показаны на рисунке 12. ГУН и генератор сигнала F1 представлены в виде стандартных блоков, входящих в состав программы моделирования, характеристики которых можно настраивать. Выходная характеристика ГУН соответствует рисунку 11. Модель ФД отличается от схемы ФД, приведённой на рисунке 4, и выполнена на трёх D-тригтерах, чтобы исключить возможность захвата ФАПЧ на субгармониках частоты F_0 . Фильтр НЧ выполнен по схеме, приведённой на рисунке 8. Входной сигнал U_x задавался источником напряжения, выходной импульсный сигнал длительностью T_x и входной сигнал U_x контролировались с помощью двухлучевого осциллографа и вольтметра, входящих в состав программы моделирования.

На рисунках 12а и 126 показана форма сигналов частот F_1 и F_0 , а также импульсного сигнала длительностью T_x для $U_x = 5$ В. Амплитуда импульсного сигнала длительностью T_x равна 10 В, период следования импульсов 100 мкс. Длительность импульса $T_x = 49,96$ мкс (T2–T1 на цифровом табло осциллографа) отличается от номинального значения 50 мкс на 0,04 мкс, что соответствует ошибке 0,08%.

На рисунках 12в и 12г показаны формы сигналов F_1 , T_x для $U_x = 1$ В и $U_x = 9$ В, соответственно. Длительности импульсов $T_x = 10,05$ мкс и $T_x = 89,99$ мкс (Т2–Т1 на цифровом табло осциллографа) отличаются от номинальных значений 10 мкс и 90 мкс на 0,05 мкс (0,5%) и 0,01 мкс (0,01%) соответственно.

На рисунке 12д показаны формы импульсного сигнала длительностью T_x и выходного сигнала ФНЧ $U_{1ун}$ для $U_x = 5$ В. Форма выходного напряжения ФНЧ имеет импульсный характер. Прямоугольные скачки напряжения соответствуют коэффициенту пропорциональности (K_{II}) ПИ-фильтра, а наклонные участки напряжения – постоянной времени интегрирования $T_{II} = 100$ мкс.

На рис. 12е показаны формы импульсного сигнала длительностью T_x и $U_{\rm гун}$ (выход ФНЧ) для $U_x = 5$ В при включении питания схемы; длительность переходного процесса не превышает 1 мс.

На рис. 12ж показаны формы сигнала U_x и импульсного сигнала дли-



Рис. 10. Выходная характеристика ФД



Рис. 11. Выходная характеристика ГУН

тельностью T_x (вход и выход ФИМ), когда на входе присутствует помеха в виде пилообразного напряжения амплитудой 4 В (80% от полезного сигнала U_x = 5 в) и частотой 10 кГц.



Рис. 12. Схема модели и результаты моделирования



Рис. 12. Схема модели и результаты моделирования (окончание)

На форме выходного импульсного сигнала длительностью T_x отсутствует дрожание фронтов; длительность импульсов $T_x = 49,97$ мкс (T2–T1 на цифровом табло осциллографа) отличается от номинального значения 50 мкс на 0,03 мкс (0,06%). Этот эксперимент демонстрирует фильтрующие способности ФИМ. Если во входном сигнале U_x будут присутствовать помехи с частотами, кратными частоте F_0 (2 F_0 , 3 F_0 , ..., nF0), то они будут полностью подавленны. Передаточная функция (3) такого фильтра показана на рисунке 13:

$$K_{\rm II} = \left| \frac{\sin^2 \pi f t_1}{\pi f t_1} \right|.$$

Динамические характеристики **ФИМ**

Преобразователь сигналов с ФИМ является следящей системой с ООС. В [5, 6] можно найти подробный вывод передаточной функции ФАПЧ, в котором применён ПИ-фильтр. Передаточная функция (математическое описание динамической системы) ФИМ W(p) соответствует колебательному звену 2-го порядка:

 $W(p) = 1/(p^2 + 2\xi\omega_{\Pi}p + \omega_{\Pi}^2),$

где p – комплексная переменная, которая может быть заменена на $j\omega$ для по-



Рис. 13. Амплитудно-частотная характеристика фильтра (3)

(4)







Рис. 15. Переходные характеристики относительной фазовой ошибки ФИМ

строения АФЧХ устройства; $\omega_{\Pi} = 2\pi F_{\Pi} -$ собственная частота ФИМ (рад/с); $F_{\Pi} -$ собственная частота ФИМ (Гц); $\xi -$ коэффициентом демпфирования (затухания) ФИМ.

На рисунке 14 показаны логарифмические АЧХ ФИМ в относительных единицах для разных значений коэффициента затухания ξ. Дополнительно приведены [6] выражения, которые связывают параметры передаточной функции ФИМ с параметрами устройств, входящих в схему преобразователя аналогового сигнала в длительность импульса:

$$ω_{\Pi}^2 = K_{\Pi} K_{\Gamma} / T_{\mu} [pa \pi/c^2],$$
 (5)
 $2\xi = K_{\Pi} \sqrt{T_{\mu} K_{\pi} K_{\mu}}$ (6)

где Кд – постоянная коэффициента передачи ФД (В/рад); Кг – постоянная коэффициента передачи ГУН (рад/с/В); Ти = R1C1 – постоянная времени интегратора ПИ-фильтра (с); Кп = R3/R1 – пропорциональный коэффициент ПИфильтра.

Амплитудно-частотная характеристика ФИМ соответствует ФНЧ 2-го порядка с частотой среза $\omega_{\rm n}$ (рад/с) (частотой переходного процесса) и спадом 20 дБ на декаду (6 дБ/октаву). При проектировании преобразователя с ФИМ следует выбирать полосу пропускания устройства $\omega_{\rm n} = 2\pi F_{\rm n}$ и коэффициентом демпфирования (затухания) ξ на частотах выше частоты среза.

Определим расчётные параметры реального преобразователя с ФИМ, который был описан ранее, и сравним их с результатами моделирования работы устройства.

Запишем параметры элементов реального преобразователя с ФИМ в буквенном выражении (см. рис. 10 и 11): $K_{\rm g} = U_{\rm p}/2\pi; K_{\rm r} = 2\pi F_0/U_{\rm p}; T_{\rm H} = 1/F_0 \, \mu F_0 = F_1.$ Подставив буквенные значения параметров в формулы (5) и (6), получим простые (для инженерной оценки) формулы для расчёта динамических характеристик преобразователя с ФИМ:

$$\omega_{\rm II} = \sqrt{F_0^2},\tag{7}$$

$$F_{\rm II} = F_0 / 2\pi,$$
 (8)

$$\xi = K_{\rm II}/2. \tag{9}$$

Подставив в формулы (8) и (9) значения параметров реального преобразователя с ФИМ, получим оценки полосы пропускания преобразователя с ФИМ $F_{\rm m} = 10 \ {\rm k} \Gamma {\rm l}/{6}, 28 = 1,6 \ {\rm k} \Gamma {\rm l}$ и коэффициента демпфирования $\xi = 0,5$.

На рисунке 15 показаны переходные характеристики относительной фазовой ошибки ФИМ при ступенчатом изменении входного сигнала [6]. В нашем примере коэффициент демпфирования ξ = 0,5. По графикам на рисунке 15 определяем, что во время переходного процесса, который продлится не более 0,8 мс, перерегулирование не превысит 30% от величины скачка. Сравнивая расчётные значения длительности переходного процесса и величины перерегулирования выходного сигнала с результатом моделирования переходного процесса при включении питания (см. рис. 12е), можно утверждать, что эксперимент подтвердил правильность расчётов.

С помощью формул (5) и (6) можно добиться желаемой характеристики переходного процесса преобразования входного сигнала путём изменения параметров элементов схемы и значения частоты преобразования *F*₀.

Выводы

- Предлагаемая схема преобразователя напряжения в длительность импульса с применением системы ФАПЧ (ФИМ) обеспечивает высокую точность преобразования.
- 2. Преобразователь с ФИМ является идеальным заграждающим фильтром помех, которые присутствуют во входном сигнале U_x , если частота помехи равна рабочей частоте преобразователя F_0 или кратна этой частоте ($2F_0$, $3F_0$ и т.д.).
- 3. Схема преобразователя с ФИМ может быть реализована на трёх ИС. Точность преобразователя определяется напряжением смещения и входными токами ОУ, стабильностью двух резисторов сравнения и источником опорного напряжения. Требования к точности и стабильности остальных элементов схемы – не более ±10%.
- Современная технология ПЛИС идеально подходит для создания преобразователя с ФИМ.

Литература

- 1. http://myrobot.ru/stepbystep/rce_pwm.php.
- Поляков К.Ю. Теория автоматического управления для «чайников». Санкт-Петербург, 2008.
- http://icmicro.narod.ru/info_ru/opamp/ opamp.htm.
- http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/2198/.
- 5. http://www.dsplib.ru/content/pll/pll.html.
- Применение интегральных схем: практическое руководство. Под ред. А. Уильямса. Мир, 1987.
- Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Мир, 1982.
- 8. http://catalog.gaw.ru/index.php?page=document&id=1478.

Новости мира News of the World Новости мира

Медно-никелевые нанопроводники – будущее печатаемой электроники

Учёные-химики из Дюкского университета создали массив из медно-никелевых нанопроводников в форме плёнки, который, как они заявляют, идеально подходит для использования в печатаемой электронике. Новая структура отлично проводит электричество даже в таких условиях, где применяемые сегодня серебряные и никелевые нанопроводники теряют свои свойства.



Ключевой особенностью созданной учёными плёнки является не только хорошая проводимость вне зависимости от внешних условий. По словам Бенджамина Уайли, одного из учёных, данная структура довольно проста и дешева в производстве. Технология имеет огромный потенциал для использования в производстве электронной бумаги, «умной» упаковки и интерактивной одежды.

Новая разработка учёных из Дюкского университета также является очередной возможной альтернативой использованию дорогой смеси оксидов индия и олова (ITO). Данный материал наносится тонкой прозрачной плёнкой на стекло, что позволяет создавать емкостные сенсоры, используемые в современных смартфонах, планшетах и электронных книгах.

Индий представляет собой редкоземельный металл, стоимость одного килограмма которого на сегодняшний день составляет 600 – 800 долларов. Практически все разведанные запасы данного металла находятся в Китае. В последнее время Китай существенно снижает экспорт этого металла, чтобы искусственно поднять цены. Кроме того, процесс создания плёнки основан на осаждении пара, что очень дорого в производстве. Покрытие из ITO чрезвычайно хрупкое, что является основной проблемой производства гибких сенсорных дисплеев. *Запеws.ru*

У графена появился очередной конкурент

Открытие графена с его уникальными свойствами заставило учёных вниматель-

ней присмотреться к другим материалам в поисках аналогий. Так, исследователи из Maccaчусетского технологического института (Massachusetts Institute of Technology) обнаружили, что тонкая плёнка из соединения висмута и сурьмы (Bi_{1-x}Sb_x) демонстрирует характеристики, аналогичные графену. Как утверждает профессор MIT Милдред Дрессельхаус (Mildred Dresselhaus), электронная проводимость соединения обладает свойством, известным как конусы Дирака. Эта характеристика, описывающая особенности энергетики электрона при его движении в материалах, наиболее ярко проявляется в графене.

Теоретически наличие конусов Дирака указывает на возможность движения электронов в материале со скоростью света. С точки зрения электроники, это позволит ускорить передачу сигналов внутри чипов в несколько раз. Кроме этого, плёнки из соединений висмут-сурьма обладают термоэлектрическими свойствами, что значительно расширяет круг их возможного применения. Это может привести к созданию новых материалов, как для генераторов энергии, так и для эффективных систем охлаждения. Однако, по словам самих учёных, до практического применения таких плёнок пока ещё очень далеко. Исследования материала только начались, и реальных подтверждений обнаруженных свойств пока нет.

http://www.physorg.com/

Физики создали полноценный транзистор из одного атома фосфора

Международная команда физиков вставила атом фосфора в подложку из кремния, превратив эту конструкцию в полноценный транзистор, выводы учёных опубликованы в журнале Nature Nanotechnology.

Транзисторы представляют собой устройства, избирательно пропускающие электрический ток. Управляемая проводимость этих приборов зависит от типа их конструкции и свойств полупроводника. Как правило, при уменьшении размеров устройства сила побочных эффектов возрастает, что побуждает учёных и инженеров точнее размещать компоненты транзисторов и разрабатывать новые методы защиты от токов утечки и других помех.

Группа физиков под руководством Мишель Симмонс (Michelle Simmons) из Мельбурнского университета (Австралия) создала прототип одноатомного транзистора на основе одного атома фосфора, прикрепив его к поверхности пластины из кремния при помощи сканирующего туннельного микроскопа.

Сначала Симмонс и её коллеги подготовили подложку – тонкую пластину из оксида кремния. Затем они нанесли на неё «дорожки» из атомов фосфора, покрыли их атомами водорода и обработали «чистую» поверхность при помощи туннельного микроскопа. Это устройство состоит из особо тонкой металлической иглы, которая считывает неровности поверхности при помощи импульсов слабого электрического тока.

Взаимодействие атомов фосфора, водорода с иглой микроскопа превращало их в молекулы газа фосфина, который легко отделялся от поверхности подложки. Это позволило учёным удалить лишний фосфор с пластины и оставить его только в тех точках, где он был нужен.

Удалив ненужные атомы с поверхности устройства, учёные «запечатали» его вторым слоем кремния и подключили металлические контакты к выходам транзистора.

Затем авторы статьи проверили своё изобретение – они охладили одноатомный транзистор при помощи жидкого гелия и следили за тем, как устройство пропускает электрический ток. В целом результаты работы экспериментального транзистора совпадали с тем, что ожидали увидеть Симмонс и её коллеги.

«Нам удалось создать великолепный пример того, как можно использовать манипулирование одиночными атомами для создания реально работающих устройств. Пятьдесят лет назад, когда был разработан первый (полевой) транзистор, никто не мог предсказать, какую роль компьютеры займут в обществе в наши дни», – пояснила Симмонс.

Как считают учёные, им удалось «обогнать» знаменитый закон Мура, описывающий темпы развития электроники. Согласно этому закону, число транзисторов на кристалле интегральных схем – процессоров, памяти – удваивается каждые два года за счёт уменьшения их размеров.

По словам Симмонс и её коллег, появление одноатомных транзисторов было «намечено» на 2020 г. Таким образом, исследователи смогли ускорить технический прогресс на восемь лет. Такой скачок вперёд является очень весомым сроком для микроэлектроники – типичный цикл жизни новой полупроводниковой схемы составляет примерно полгода, а цикл разработки редко длится больше двух-трёх лет.

http://www.nature.com