

# МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЭФФЕКТА МИЛЛЕРА ПРИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ БИПОЛЯРНЫХ МИКРОСХЕМ

**АНАТОЛИЙ БЕЛОУС**, зам. директора, НТЦ «Белмикросистемы» НПО «Интеграл»,  
**ВИТАЛИЙ СОЛОДУХА**, генеральный директор НПО «Интеграл»,  
**ВИТАЛИЙ СОКОЛ**, зав. кафедрой микро- и нанoeлектроники БГУИР,  
**ВАЛЕНТИН СЯКЕРСКИЙ**, директор НТЦ «Белмикросистемы» НПО «Интеграл»

*Эффект Миллера по-прежнему остается серьезной проблемой в различных электронных устройствах и системах, где выходы одной микросхемы подключаются к физической линии связи, к которой также подключаются входы других микросхем, участвующих в передаче и обработке информации. Этот эффект снижает помехоустойчивость и ухудшает надежные характеристики микросхем. В статье рассматриваются практические рекомендации, схемотехнические решения и методы защиты выходных каскадов биполярных микросхем от токов Миллера.*

Разработчики радиоэлектронных устройств, использующие современную быстродействующую элементную базу, хорошо знакомы с проблемами, которые до сих пор преподносят им т.н. эффект Миллера. Хотя впервые этот паразитный эффект теоретически был обнаружен и описан более сорока лет назад [1], он до сих пор является «головной болью» как для разработчиков микросхем, так и для проектировщиков различных электронных устройств и систем, где выходы одной микросхемы подключаются к физической линии связи (металлизированный проводник на плате или проводная линия), к которой также подключаются входы других микросхем, участвующих в процессе передачи и обработки информации.

Этот эффект носит универсальный характер — он проявляется как в биполярных, так и в КМОП- и БИКМОП-микросхемах, поскольку его следстви-

ем является увеличение выходной емкости оконечного транзистора при его выключении из-за наличия положительной обратной связи с его выхода на вход. Кроме очевидного негативного воздействия на производительность электронного устройства (снижение быстродействия), эффект Миллера снижает помехоустойчивость и ухудшает надежные характеристики микросхем, а при воздействии ионизирующих излучений поведение микросхемы с неподавленным эффектом Миллера становится непредсказуемым.

Прежде чем рассматривать отдельные схемотехнические методы борьбы с этим эффектом, целесообразно кратко напомнить его суть.

Рассмотрим данный эффект на примере биполярного п-р-п-транзистора, показанного на рисунке 1а. Значение выходной емкости транзистора можно определить из выражения [2]:

$$C_o = \frac{dQ_o}{dU_o} = I_o \frac{dU_o}{dt} \quad (1)$$

где  $Q_o$  — величина накопленного на емкости заряда;

$I_o = I_k + I_c$ ,  $U_o$  — выходные ток и напряжение;

$t$  — время;

$I_k$  — ток, втекающий в коллектор транзистора;

$I_c$  — ток, протекающий через эквивалентную емкость коллекторного перехода  $C_k$ .

Полагая, что весь ток  $I_c$  попадает в базу транзистора и пренебрегая входной емкостью транзистора, запишем выражение для нагрузочного тока в следующем виде:

$$I_o = I_c \beta + I_c = I_c (\beta + 1), \quad (2)$$

где  $\beta$  — коэффициент усиления тока базы п-р-п-транзистора.

Значение коллекторного тока  $I_c$  определяется выражением:

$$I_c = C_k \frac{dU_c}{dt} \approx C_k \frac{dU_o}{dt} \quad (3)$$

Таким образом, из (1)—(3) получаем:

$$C_o = C_k \frac{dU_o}{dt} (\beta + 1) \left/ \left( \frac{dU_o}{dt} \right) \right. = C_k (\beta + 1). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что эффективное значение выходной емкости транзистора приблизительно в  $\beta$  раз превышает значение собственной

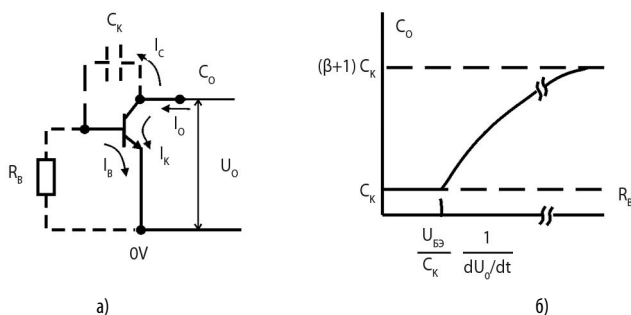


Рис. 1. Эквивалентная схема для расчета емкости Миллера (а) и зависимость выходной емкости от сопротивления базы  $R_b$  (б)

емкости коллектора. Для типовых значений  $\beta = 30 \div 150$  видно, что эффект значительно увеличивает выходную емкость  $C_o$  транзистора и ухудшает его динамические свойства.

Основным способом ослабления этого эффекта является создание цепей в базе n-p-n-транзистора, отводящих в общую шину емкостной ток обратной связи  $I_c$  резистор  $R_b$  (см. рис. 1а).

В этом случае выражение для выходного тока транзистора принимает вид:

$$I_c = I_k + I_c = (I_c - \frac{U_{бэ}^{VT}}{R_b})\beta + I_c = I_c(\beta + 1) - \frac{\beta U_{бэ}^{VT}}{R_b}. \quad (5)$$

Тогда выражение трансформируется в следующий вид:

$$C_o = (\beta + 1)C_k - \beta \frac{U_{бэ}}{R_b} \frac{1}{dU_o/dt} \quad (6)$$

Для крайнего случая  $R_b \rightarrow \infty$ , (режим оборванной базы, когда весь ток  $i_c$  попадает в базу транзистора):

$$C_o \approx (\beta + 1)C_k. \quad (7)$$

С другой стороны, при значениях

$$R_{BO} \approx \frac{U_{бэ}}{C_k} \frac{1}{dU_o/dt} \quad (8)$$

значение выходной емкости  $C_o$  будет равно собственной емкости коллекторного перехода ( $C_o = C_k$ ).

Поскольку в диапазоне  $0 < R_b < R_{BO}$  транзистор выключен, весь ток  $I_c$  ответвляется в шину 0 В, и выходная емкость  $C_o = C_k$  практически не изменяется (см. рис. 1б).

Аналогичным образом можно получить выражения для оценки выходной емкости и МОП-транзисторов КМОП БИС. В любом случае, конкретные численные значения эквивалентного сопротивления цепи базы необходимо выбирать из требуемого быстродействия, т.к. его снижение, уменьшающее эффективную выходную емкость, одновременно ухудшает времена включения/выключения транзистора.

Конечно, пример с резистором в цепи базы  $R_b$  является достаточно грубым, но в целом правильно указывает направление исследований путей подавления эффекта Миллера в конкретных микросхемах, независимо от типа технологии и их конструктивно-схемотехнической базы.

Ниже представлено описание ряда конкретных схемотехнических способов защиты от токов Миллера, используемых разработчиками НПО «Интеграл» для проектирования выходных каскадов биполярных ТТЛШ-микросхем.

Прежде всего следует отметить, что эффект Миллера имеет место как в динамическом, так и в статическом

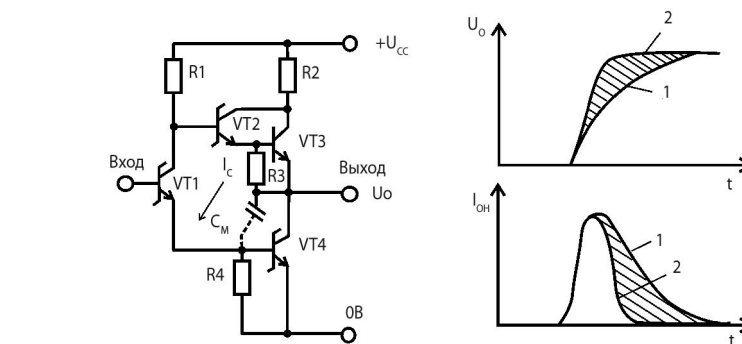


Рис. 2. Схема выходного каскада ТТЛШ ИС с емкостью Миллера (а) и диаграммы выходных напряжений  $U_o$  (б) и тока  $I_{oh}$

режимах работы микросхем, и, соответственно, разработчик при выборе конкретного способа должен учитывать особенности работы проектируемой микросхемы в конкретном устройстве, что для него будет более актуальным.

Как уже отмечалось, паразитный эффект Миллера в значительной степени влияет на быстродействие выходных каскадов ТТЛШ ИС в динамическом режиме. На рисунке 2а изображена электрическая схема стандартного выходного каскада. Допустим, что он переключается из состояния низкого уровня в высокий. При этом транзистор VT1 закрывается, и входная емкость транзистора VT4 разряжается через резистор R4, что вызывает возрастание выходного напряжения  $U_o$ .

Поскольку выходной транзистор VT4 обладает значительной емкостью перехода коллектор-база  $C^{VT4}$ , то при изменении выходного напряжения  $U_o$  через эту емкость течет емкостной ток, определяемый выражением:

$$I_c = C^{VT4} \cdot \frac{\Delta U_o}{\Delta t}. \quad (9)$$

Этот ток создает на резисторе R4 падение напряжения:

$$U_{R4} = I_c \cdot R_{R4}, \quad (10)$$

которое поддерживает выходной транзистор VT4 в открытом состоянии и увеличивает значение его выходного тока, что эквивалентно увеличению выходной емкости транзистора VT4 (емкости Миллера) в  $\beta_N$  раз:

$$C_o = C_M = C^{VT4} \cdot \beta_N \quad (11)$$

Это, в свою очередь, увеличивает длительность перехода выходного напряжения  $U_o$  в состояние высокого уровня (см. кривую 1 на рис. 2б). Поскольку степень влияния эффекта Миллера определяется значением сопротивления резистора R4 в базе выходного транзистора VT4, основным методом защиты от динамического тока Миллера является создание низкоомных цепей отвода емкостного тока

$I_c$  в базе выходного транзистора VT4. Для устранения этого эффекта необходимо использовать управляемые транзисторные цепи, включаемые при переходе выходного каскада в состояние высокого уровня.

Так, в схеме на рисунке 3а [3] введена дополнительная цепь из транзистора VT6, резисторов R2, R7, диодов VD1, VD2, VDS. Во включенном состоянии выходного каскада транзистор VT6 закрыт и на работу транзистора VT4 не влияет, т.к. открытый транзистор VT1 через диод VDS перехватывает ток резистора R1. При выключении каскада напряжение на коллекторе транзистора VT1 возрастает, что приводит к запирающему диоду Шоттки VDS и отпиранию транзистора VT6, который отводит емкостной ток Миллера транзистора VT4 в общую шину 0V и удерживает напряжение небольшого значения на базе транзистора VT4 в выключенном состоянии. При этом длительность фронта выключения выходного сигнала  $\tau_{LH}$  резко снижается (см. кривую 2 на рис. 2б).

Недостатком таких схем является то, что они потребляют мощность в выключенном состоянии, что увеличивает общую мощность потребления каскада. По результатам анализа литературы можно предложить ряд схем, использующих емкостные компоненты и функционирующих только в момент выключения выходного каскада.

Электрическая схема с цепью такого типа приведена на рисунке 3б [4] и содержит транзистор VT6 с диодом Шоттки VDS, представляющий собой схему отвода тока Миллера, резистор R5 и диод VD, управляющие цепью защиты. При этом p-n-диод VD используется в качестве емкости, что видно из рисунка. При переходе в статическое выключенное состояние емкостной ток диода  $I_c$  резко падает, и транзистор VT6 отключается.

Применение в схемах выходных каскадов транзисторов p-n-p-типа (см. рис. 3в) позволяет создать схему защиты от «динамического» тока Миллера, где n-p-n-транзистор VT5 формирует цепь отвода тока Миллера выходного

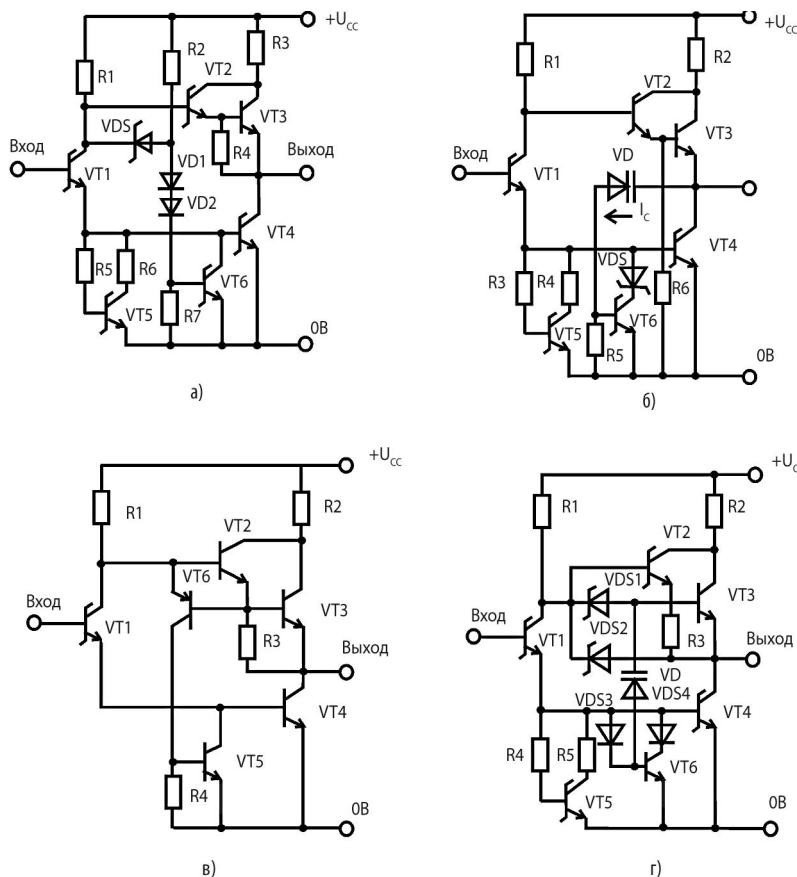


Рис. 3. Рекомендуемые схемы выходных каскадов ТПЛШ ИС с защитой от «динамического» тока Миллера: а) с диодно-транзисторной цепью, управляемой коллектором фазоразделительного транзистора; б) с динамическим управлением по выходу ЭС; в) с динамическим управлением п-п-р-транзистором; г) с динамическим управлением с коллектора фазоразделительного транзистора

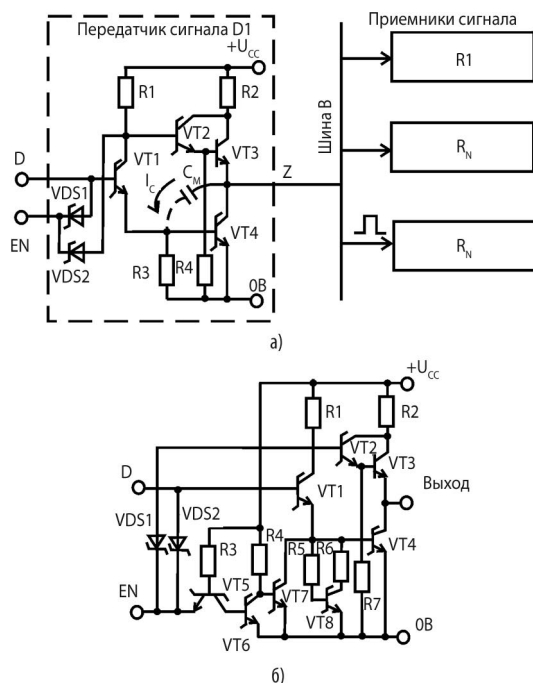


Рис. 4. Схема, поясняющая механизм возникновения тока Миллера в стандартном выходном каскаде типа ТС, находящемся в статическом состоянии (а) и схема выходного каскада с защитой от «статического» тока Миллера (б)

транзистора VT4, а p-n-p-транзистор VT6 представляет собой управляющую цепь защиты. Во включенном состоянии выходной транзистор VT4 открыт, а выходной транзистор VT3 закрыт,

поэтому ток эмиттера транзистора VT6 близок к нулю и цепь защиты отключена. При переходе каскада из включенного состояния в выключенное по цепи эмиттера транзисторов VT2, VT3

протекает ток, управляющий зарядом емкости нагрузки  $C_L$  и выходной емкости  $C_0$ . Это вызывает отпирание p-n-транзисторов VT6 и VT5; последний отводит в общую шину 0V возникающий в этот момент ток Миллера выходного транзистора VT4. При возрастании выходного напряжения до установившегося высокого уровня  $U_{OH}$  транзисторы VT2, VT3 закрываются, что приводит к отключению p-n-транзистора VT6 и отключению цепи защиты выходного каскада.

На рисунке 3г представлено более сложное схемотехническое решение выходного каскада с защитой от динамических токов Миллера. Цепь защиты включает транзистор VT6, диоды Шоттки VDS5, VDS6 и диод VD, используемый в качестве интегральной емкости. Основное отличие данной схемы заключается в управлении цепью защиты по изменению уровня напряжения на коллекторе фазоразделительного транзистора, что при соответствующем компьютерном моделировании работы каскада позволяет оптимально совместить по времени моменты максимального отпирания транзистора цепи отвода тока Миллера и пикового значения тока Миллера. При переходе каскада в установившееся состояние высокого уровня ток через диод резко падает, что приводит к быстрому отключению схемы защиты.

В отличие от описанного эффекта, проявляющегося в динамическом режиме работы выходного каскада, эффект Миллера может проявляться и в статическом режиме работы. На рисунке 4а приведена схема выходного каскада, подключенного к шине передачи сигналов и находящегося в «третьем состоянии».

Поскольку к шине могут быть подключены другие передатчики ( $D_N$ ) и приемники ( $R_1—R_N$ ) сигналов, то при передаче сигналов по шине  $D_N$  в выходной цепи передатчика сигналов  $R_1$  (транзистор VT4) может протекать емкостный ток  $I_c$ , пропорциональный емкости коллектор-база  $C_{кб}$  транзистора VT4. Этот ток, протекая через резистор R3, создаст на нем падение напряжения, которое может привести к приоткрыванию выходного транзистора VT4 и увеличению выходного тока передатчика сигналов  $D_1$ , что эквивалентно увеличению выходной емкости  $C_0$  каскада передатчика в  $\beta$  раз и неизбежно приведет к ухудшению условий передачи сигналов по шине B. Для устранения этого эффекта в выходных каскадах наших микросхем часто используют управляющие транзисторные цепи, создающие низкоомную цепь отвода тока Миллера выходного транзистора VT4 в «третьем» состоянии.



## ЗАО «ПКК Миландр»

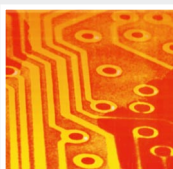
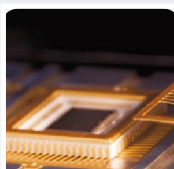
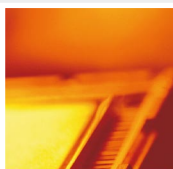
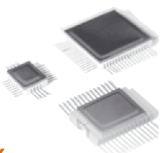
Производитель микросхем двойного и специального назначения (ВП, ОТК, безкорпусное исполнение) в том числе:

- поставка отладочных средств (программные и аппаратные)
- постоянная техническая поддержка (консультация специалистов, обучение, сотрудничество в разработке)

Разработка интегральных микросхем

Сертификация и испытание микросхем (иностраных производителей)

Поставка импортных и отечественных электронных компонентов



[www.milandr.ru](http://www.milandr.ru)

Адрес:  
124498, Москва,  
Зеленоград  
проезд 4806, д.6

телефон/факс:  
+7(495)601-95-45  
+7(495)981-54-33  
+7(495)739-02-81

Рекомендуемая для практического применения электрическая схема выходного каскада типа «три состояния» с защитой от «статического» тока Миллера приведена на рисунке 46. При подаче на управляющий вход EN сигнала высокого уровня диоды Шоттки VDS1, VDS2 и транзистор VT7 закрыты, и каскад функционирует как обычный элемент типа «активный выход». При подаче низкого уровня сигнала на вход EN диоды Шоттки VDS1, VDS2 открываются, напряжение на базе транзисторов VT1—VT3 падает, что приводит к переходу выхода элемента в «третье состояние». Однако при этом одновре-

менно включается и цепь отвода тока Миллера, содержащая транзисторы VT5—VT7 и отводящая ток Миллера выходного транзистора VT4 в общий вывод 0V.

Таким образом, рассмотренные в этой статье практические рекомендации, схемотехнические решения и методы защиты выходных каскадов биполярных микросхем от токов Миллера, основанные на введении в их электрические схемы низкоомных цепей нейтрализации этих токов, могут быть полезны разработчикам и потребителям быстродействующих и надежных микросхем.

## НОВОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**МИНКОМСВЯЗИ ДЕЛАЕТ СТАВКУ НА WiMAX** | Минкомсвязи предлагает развернуть в 62 регионах России сети WiMAX, работающие в диапазоне 2,3...2,4 ГГц.

По прогнозам рабочей группы президентской комиссии по модернизации экономики, через три года количество отечественных пользователей мобильного и фиксированного широкополосного доступа в интернет сравняется, а каждый пятый абонент ШПД будет пользоваться сетями WiMAX.

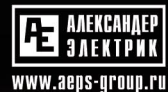
В конце октября министр связи и массовых коммуникаций Игорь Щёголев, возглавляющий рабочую группу, представит на заседании комиссии пилотный проект создания WiMAX-сетей на основе российского оборудования. Проект предполагает до конца 2012 г. развернуть их на территории 40 регионов, где уже имеется доступный частотный ресурс. Для этого потребуется 30 млрд руб. инвестиций. Еще в 22 регионах, где продолжается «расчистка» радиочастотного спектра, строительство начнется после 2012 г. и обойдется в 16,5 млрд руб.

Если в конце 2012 г. к беспроводному ШПД через WiMAX будут подключены 12 млн абонентов, то в последующие три года к ним присоединятся еще 5 млн человек, считают в Минкомсвязи.

Конкурс на частоты в диапазоне 2,3...2,4 ГГц на территориях 40 регионов будет объявлен в декабре 2009 — феврале 2010 гг.

[www.russianelectronics.ru](http://www.russianelectronics.ru)

DC/DC преобразователи серии MR-Z  
СПЕЦИАЛЬНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ



Новинка!  
для ж/д  
транспорта

- Низкопрофильная конструкция!
- Выходная мощность 10...160 Вт
- Соответствие стандарту EN50121-3-2
- Диапазон рабочих температур -60...+125°C
- Полный комплекс защит и сервисных функций
- Защита от перенапряжений по входу до 500В @ 20 мс

ВОРОНЕЖ:  
Т/Ф: (4732) 519-518  
ALEXDON@YMAIL.RU

МОСКВА:  
Т/Ф: (495) 674-93-70  
AEI@AEDON.RU

ПРАГА:  
Т/Ф: +420 266-107-455  
AEPS@AEPS-GROUP.COM

## ЛИТЕРАТУРА

1. Berger H.H., Wiedman S.K./IEEE Solid State Circuits, 1974, vol.SC-9, #5, p.212.
2. Белоус А.И., Силин А.В., Пономарь В.Н. Схемотехника биполярных микросхем для высокопроизводительных систем обработки информации. — Минск: — Тарпей, 1998. — С. 154—157.
3. Белоус А.И., Журба В.М., Подрубный О.В. Микропроцессорный комплект БИС для цифровой обработки сигналов. — М.: Радио и связь, 1992, С. 250—253.
4. Белоус А.И., Блинков О.В., Силин А.В. Биполярные микросхемы для интерфейсов систем автоматического управления — Л.: Машиностроение, 1990, С. 251.