

# Схемотехника электронных устройств, работающих в условиях электромагнитных помех

Ю.Ф. Адамов, Е.С. Балака, В.С. Рухлов

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, vladimir.rukhlov@ippm.ru

**Аннотация** — Помехоустойчивость и энергоэффективность электронных устройств определяются подсистемой синхронизации и передачи сигналов. Помехи делятся на два класса: внешние и внутренние. Борьба с внешними помехами основана на включении в состав микросхем защиты выводов. Для подавления внутренних помех длинные проводники разделяются на секции, управляемые драйверами-повторителями сигналов. В настоящей работе описаны методы проектирования повторителей сигнала и устройств защиты выводов с учетом их влияния на параметры разрабатываемых микросхем: снижение создаваемых помех, устойчивость к внешним помехам типа электростатического разряда, передача сигналов без потерь. Предложены оригинальные решения для реализации формирователей импульсов напряжения и приемно-передающих устройств типа "цифровой изолятор".

**Ключевые слова** — помехоустойчивость, передача сигналов, электростатический разряд, устройства защиты, эквализация сигналов, формирование импульсов напряжения, снижение энергопотребления.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуются схемотехнические решения для повышения помехоустойчивости электронных устройств, реализуемых на основе субмикронных КМОП технологий.

Повышение помехоустойчивости достигается применением новых схемотехнических решений и методов оптимизации узлов и блоков современных систем на кристалле (СнК).

Задача повышения помехоустойчивости объединяет два направления: передача и распространение сигналов на кристалле микросхемы с учетом взаимодействия внутренних помех; передачу и прием сигналов между микросхемами в составе электронной аппаратуры в условиях воздействия внешних помех.

В работе рассмотрены известные и новые варианты реализации узлов и блоков с повышенной помехоустойчивостью. Приведенные результаты подтверждены моделированием характеристик КПОМ устройств и блоков с субмикронными размерами элементов.

## II. СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ К ВНУТРЕННИМ ПОМЕХАМ

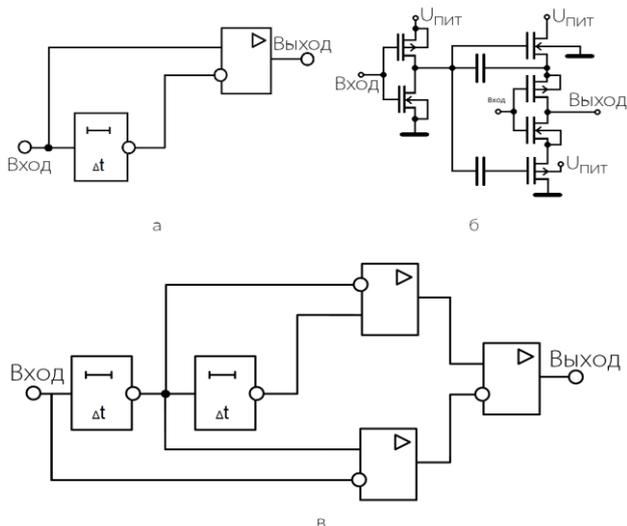
Электромагнитные помехи, как правило, присутствуют в процессе эксплуатации сложных электронных систем. Источниками помех могут быть проводники в линиях связи, цепи электропитания и внешние электромагнитные излучения. В настоящей работе рассмотрены помехи, возникающие в результате функционирования интегрированных КМОП электронных систем.

Наиболее распространенной задачей борьбы с помехами является прием и передача сигналов по линиям связи с потерями. Для помехоустойчивой передачи импульсных сигналов на кристалле микросхемы эффективно используются драйверы-повторители, восстанавливающие амплитуду и длительность фронтов сигналов. С уменьшением размеров элементов в современных микросхемах уменьшается ширина проводников, а сопротивление на единицу длины возрастает. С уменьшением зазоров между проводниками возрастает их погонная емкость, что уменьшает длину проводника, на которой происходит затухание сигнала. Для компенсации затухания необходимо увеличить число драйверов и уменьшить расстояние между ними. При этом возрастает площадь кристалла и энергопотребление системы связи.

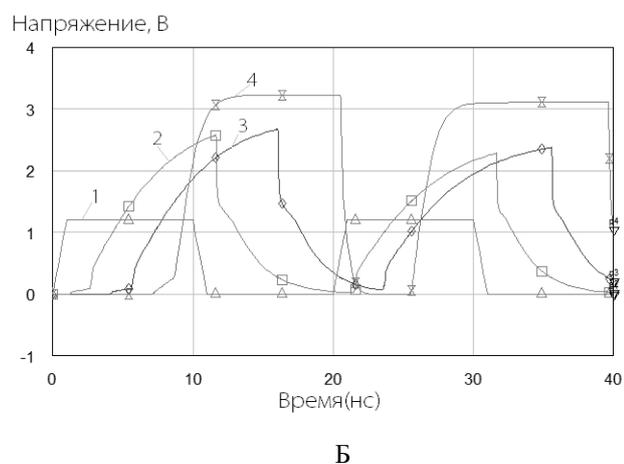
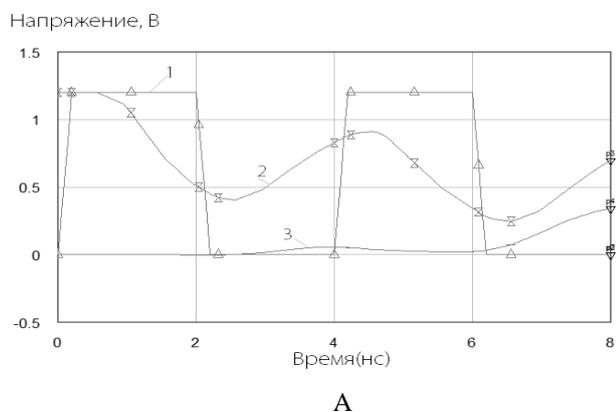
Альтернативным решением является использование драйверов-повторителей с разным диапазоном входных и выходных сигналов. Входной инвертор повторителя имеет низкое напряжение переключения, а выходной инвертор формирует импульсный сигнал с повышенной амплитудой. Амплитуда сигнала ослабляется сопротивлением и емкостью проводника до уровня, превышающего порог переключения следующего входного инвертора. Такую систему передачи информации просто организовать, используя два источника электропитания с разными напряжениями и два типа инверторов с разными порогами переключения и разными допустимыми напряжениями питания. При этом усложняются технология и конструкция микросхемы.

Предлагается другое оригинальное решение, в котором повышение амплитуды выходного сигнала драйвера достигается за счет еще одного инвертора и переключаемых конденсаторов, рис. 1. При этом

используются только один источник электропитания и один тип КМОП транзисторов [1]. На их основе реализуется двухступенчатый драйвер с повышением амплитуды в 3 раза, рис. 1(в).



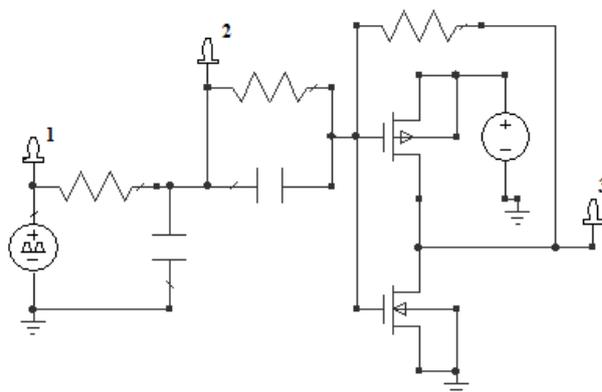
**Рис. 1. Логическая (а) и электрическая (б) схемы одноступенчатого драйвера, логическая схема двухступенчатого драйвера (в)**



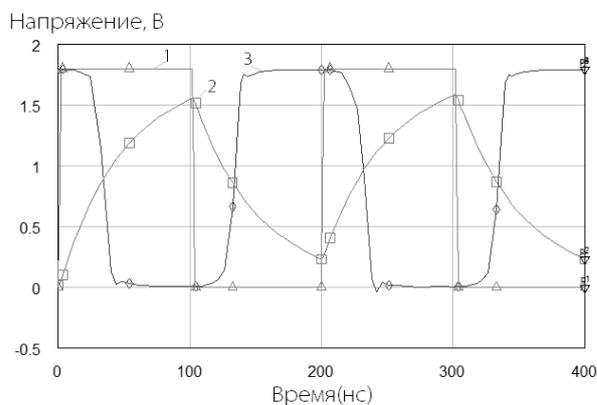
**Рис. 2. Форма входных и выходных сигналов драйверов**

На графиках (рис. 2а) показан затухающий сигнал, прошедший через 2 драйвера-повторителя. Цифрами обозначены: 1 - входной сигнал, 2 - выход после первого драйвера, 3 - выход после второго драйвера. На рис. 2б показаны графики драйвера с повышением амплитуды: 1 - входной сигнал, 2 - сигнал после первого драйвера, 3 - сигнал после второго драйвера, 4 - сигнал после третьего драйвера.

Применение драйверов-повторителей возможно только в микросекундном исполнении. Искажения формы импульсных сигналов, соединяющих микросхемы проводника, происходят на печатной плате и в разных блоках. Разместить множество драйверов в конструкции аппаратуры с подключением их к электропитанию сложно и нецелесообразно. Решение проблемы снижения амплитуды при передаче сигнала достигается комплексом решений, включающим использование экранированных проводников с низкими потерями энергии сигнала, а также применением эквалайзеров во входных цепях микросхем [2]. На рис. 3 и 4 приведены электрическая схема эквалайзера и форма сигнала ДО и ПОСЛЕ экваллизации.



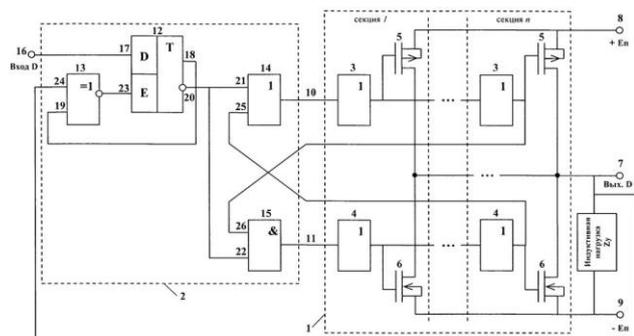
**Рис. 3. Электрическая схема эквалайзера. (1) – вход линии связи, (2) – вход эквалайзера, (3) – выход эквалайзера**



**Рис. 4. Форма сигнала ДО и ПОСЛЕ экваллизации**

Проблемы с достоверностью передаваемой информации возникают не только в приемнике, но и в передатчике импульсных сигналов. Их причиной является отсутствие согласования импедансов передатчика и проводника в линии связи. Если нагрузка передатчика имеет индуктивный характер, то на переходной характеристике сигнала появятся выбросы с отрицательной полярностью. Амплитуда отрицательных импульсов возрастает при увеличении амплитуды выходного сигнала и уменьшении длительности среза импульса. Импульс отрицательной полярности вызывает инжекцию электронов изолирующим р-п переходом в КМОП выходных транзисторах [3]. В подложках высокого качества с р-типом проводимости электроны способны диффундировать на расстояние более 1 мм. Следствием инжекции электронов в подложку является смещение изолирующих р-п переходом и изменение режима работы МОП транзисторов. Аналоговые блоки более чувствительны к паразитной инжекции по сравнению с цифровыми. Наибольшую чувствительность имеют микросхемы, включающие фотоприемные устройства.

Ограничения на индуктивность проводников в нагрузке микросхемы ограничивают область ее применения и конкурентоспособность продукции. В большинстве случаев можно увеличить критическую индуктивность нагрузки, увеличив длительности фронтов выходного сигнала. На рис. 5 приведена схема выходного формирователя импульсов напряжения, в которой адаптивно осуществляется коррекция длительности фронтов выходного сигнала в широком диапазоне возможной индуктивности нагрузки [3].



**Рис. 5. Схема выходного формирователя импульсов напряжения**

### III. МЕТОДОЛОГИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ВНЕШНИХ ПОМЕХ

Электромагнитные излучения, создаваемые электростатическими разрядами (ЭСР), реально могут влиять на искажения сигналов в электронных устройствах. Однако, опасность ЭСР для сохранения работоспособности устройства значительно важнее. Поэтому, усилия разработчиков электронных устройств направлены на исключение условий, в которых возникают ЭСР.

Как правило, проблемы надежности решаются комплексно и на нескольких уровнях реализации проекта. На конструктивно-технологическом уровне реализации микросхем решается задача снижения влияния эффекта накопления заряда (электризации) изолированных проводников и диэлектриков. Эффект электризации материалов микросхем в процессе плазмохимической обработки пластин в отсутствие средств защиты создает ЭСР, разрушающие физическую структуру микросхемы и снижающие до нуля выход годных изделий. Для снижения эффекта электризации все проводники, несоединенные с полупроводниковой структурой, подключаются к защитным диодам. Ионизация полупроводниковой структуры в процессе обработки пластин создает ток утечки защитных диодов, препятствующий накоплению зарядов.

Сопротивление изолирующих диэлектрических слоев очень велико, но не бесконечно. Снижение сопротивления диэлектрических слоев в микросхемах достигается введением сетки изолированных (фиктивных) проводников в каждом уровне металлизации. Описанные конструктивные решения препятствуют возникновению ЭСР в структуре микросхемы не только в процессе плазмохимической обработки пластин, но и при эксплуатации изделий в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Методология защиты микросхем от ЭСР сосредоточена на защите выводов. Принцип защиты основан на переключении тока ЭСР в шины питания микросхем. Основные проблемы защиты микросхем от ЭСР связаны с необходимостью совместить надежность защиты с сохранением других целевых показателей (функциональность, энергоэффективность, технологическая реализуемость и др.)

Для оценки методологии рассмотрим несколько примеров. Типовой элемент защиты вывода микросхемы от ЭСР включает датчик перепада напряжения и фиксатор напряжения, включающий один или два мощных ключевых транзистора [4], рис. 6.

Размеры ключевых транзисторов определяют максимально допустимый ток разряда и площадь, занятую элементом защиты. С повышением степени интеграции возрастает число выводов микросхемы и процент площади, занятый мощными ключевыми транзисторами. В сложных микросхемах с большим числом выводов предпочтение отдается распределенным системам защиты от ЭСР [5]. В непосредственной близости от контактных площадок остаются диодные или транзисторные коммутаторы токов и детекторы перепада. Мощные ключевые транзисторы равномерно распределены по периметру кристалла микросхемы. Разряд через вывод микросхемы регистрируется детектором перепада и активирует формирователь сигнала, открывающий все мощные ключевые транзисторы. При любой полярности напряжения разряда ток стекает в шины

электропитания и заземления. Общая площадь мощных ключевых транзисторов в распределенной системе защиты меньше, чем в наборе локальных устройств защиты от ЭСР.

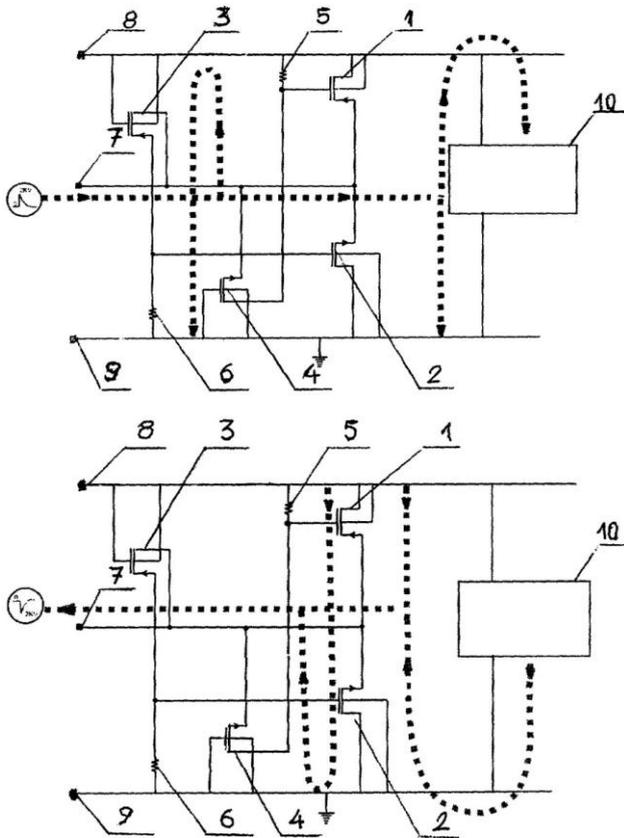


Рис. 6. Работа схемы переключения втекающего и вытекающего токов ЭСР в шины питания микросхемы

Уменьшение размеров мощных транзисторов достигается также увеличением управляющего напряжения и требует введения дополнительной шины и источника электропитания. Альтернативным решением является использование управляющих драйверов с повышением амплитуды выходного сигнала. Повышение управляющего сигнала позволяет пропускать больший ток ключевых транзисторов. Повышение амплитуды выходного сигнала драйвера достигается в схеме переключением конденсаторов. На рис. 7 приведены варианты схемы драйвера с переключаемыми конденсаторами, а на рис. 8 – графики изменения выходного сигнала от времени.

Рассмотрим средства защиты проводной линии связи от воздействия мощных электромагнитных помех. В таких случаях используются устройства, называемые «цифровой изолятор». Исторически эти устройства строились на основе оптронов. Однако, в современной технике устройства типа «цифровой изолятор» реализуются на радиотехнических принципах, так как оптрон не интегрируется в состав микросхемы [6].

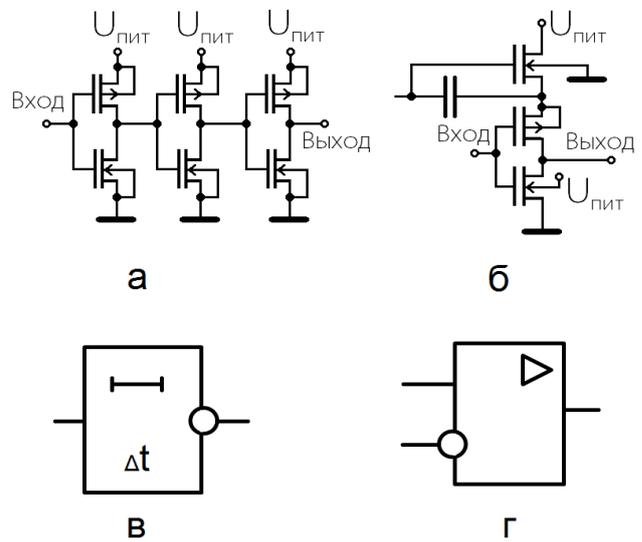


Рис. 7. Части схемы (а, б) и условные обозначения драйвера (в, г) с повышением амплитуды выходного сигнала

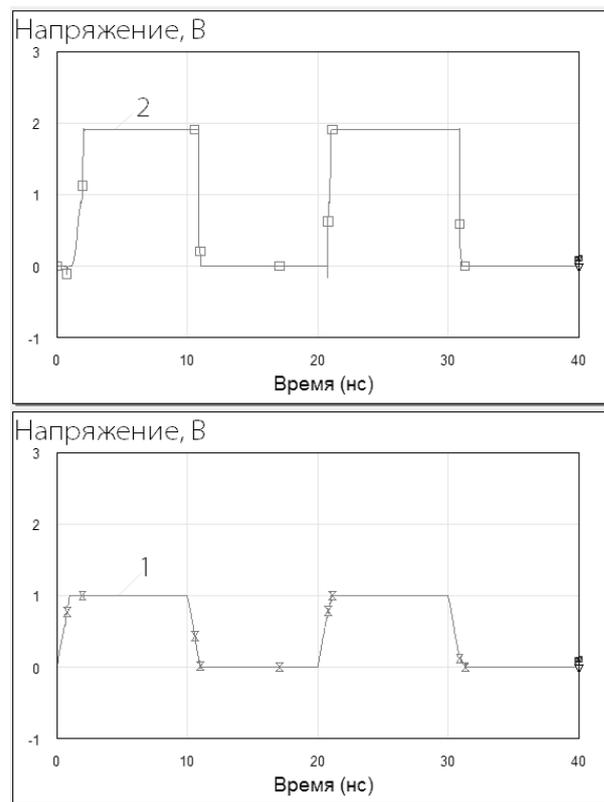
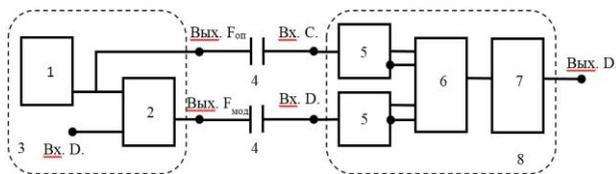


Рис. 8. Графики входного (1) и выходного (2) сигналов драйвера с переключаемыми конденсаторами

В «цифровом изоляторе» приемник и передатчик имеют независимые подсистемы электропитания и соединены между собой через высоковольтные конденсаторы. Передатчик моделирует высокочастотный сигнал, а приемник его улавливает и демодулирует. В отличие от устройств с оптроном передатчик и приемник могут быть объединены на одном кристалле микросхемы, что позволяет

реализовать двунаправленный канал связи. На рис. 9 приведена оригинальная структурная схема «цифрового изолятора».

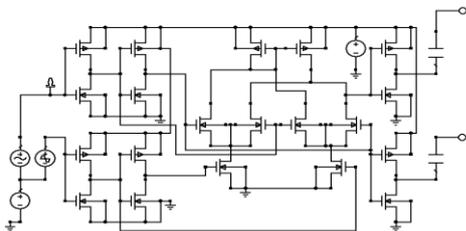


**Рис. 9. Структурная схема «цифрового изолятора»**

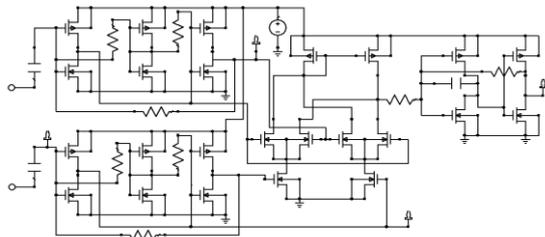
На рис. 9 цифрами обозначены следующие блоки:

1. Генератор сигнала несущей частоты (1 МГц).
2. Фазовый манипулятор.
3. Блок передатчика.
4. Разделительные конденсаторы в линии связи.
5. Формирователь импульсов напряжения (эквалайзер).
6. Демодулятор.
7. Фильтр нижних частот и формирователь импульсов напряжения выходного сигнала.

В модели «цифрового изолятора» частота несущего сигнала в 10 раз превышает максимальную частоту информационного сигнала. В схеме передатчика информационный импульсный сигнал управляет процессом фазовой манипуляции несущего импульсного сигнала. Для передачи информации требуется два канала связи, по которым передаются опорный сигнал несущей частоты и информационный сигнал несущей частоты с модулированной фазой. Информационное состояние определяется соотношением фаз передаваемых сигналов. Однако состояние соответствует режиму передачи синфазных сигналов, второе состояние соответствует передаче противофазных сигналов.



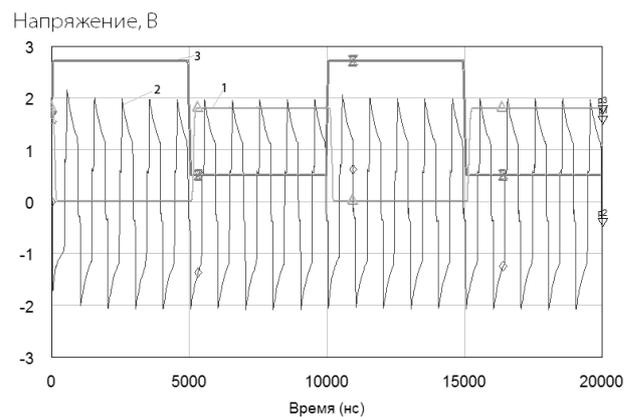
**Рис. 10. Схема передатчика «цифрового изолятора»**



**Рис. 11. Схема приемника «цифрового изолятора»**

Фазовая манипуляция импульсных сигналов легко реализуется в схеме на основе цифровых логических элементов. Схема приемника с демодулятором также построена на основе библиотеки цифровых элементов. Блоки передатчика и приемника «цифрового изолятора» могут быть интегрированы в структуру «системы на кристалле». Электрические схемы передатчика и приемника приведены на рис. 10 и 11, соответственно.

Для модуляции и демодуляции информационного сигнала использована ячейка Гильберта в КМОП исполнении [5]. Для подавления высокочастотной составляющей информационного сигнала на выходе приемника использован фильтр нижних частот. Формы входного и выходного импульсных сигналов приведены на рис. 12 (графики 1 и 3, соответственно, 2 – сигнал помехи). Задержка сигнала в схеме изолятора приблизительно равна периоду несущей частоты.



**Рис. 12. График работы устройства при воздействии помех**

Защита электронных устройств от воздействия электромагнитных помех требует использования комплексной системы защиты, основанной на применении набора современных схемотехнических решений.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача обеспечения помехоустойчивости КМОП "систем на кристалле" требует конкретные показатели ожидаемых условий эксплуатации. Развитие схемотехники помехоустойчивых СнК осложняется уменьшением размеров элементов, повышением требований к быстродействию микросхем. Достижение требуемых показателей помехоустойчивости субмикронных и нанометровых микросхем требует комплексной оптимизации с использованием аттестованных функциональных блоков.

Развитие схемотехники помехоустойчивых СнК непосредственно связано с расширением номенклатуры аттестованных помехоустойчивых функциональных блоков.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воловин Г. "Драйверы силовых ключей" современная электроника №8, 2007, с.32-40.
- [2] Тимошенко В.П., Шалимов А.С., Тимошенко А. С. "Восстановление импульсных сигналов в кабельных линиях связи" инженерный вестник дона, 2012, №4(часть 2).
- [3] Адамов Ю.Ф., Горшкова Н. М., Стемпковский А.Л. Патент РФ №2483437 "Формирователь импульсов напряжения с устройством защиты от отрицательных выбросов при подключении индуктивной нагрузки".
- [4] Горшкова Н.М., Губин Я.С., Сибатуллин А.Г. Патент РФ №2308146 "Устройство защиты выводов интегральных схем со структурой мдп от электростатических разрядов".
- [5] Д.А. Копцев, В.А. Дмитриев "разработка монолитных интегральных схем переменного тракта".
- [6] URL: [http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2007\\_10\\_40.php](http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2007_10_40.php) (дата обращения: 25.02.2016) Преимущества применения сдвоенного емкостного барьера в новых цифровых изоляторах Texas Instruments Пичугин С.

# The circuitry of electronic devices that operate in conditions of electromagnetic noise

U.F. Adamov, E.S. Balaka, V.S. Rukhlov

Institute for Design Problems in Microelectronics RAS, vladimir.rukhlov@ippm.ru

**Keywords — noise immunity, signal transmission, electrostatic discharge, protection device, signal equalization, formation of the voltage pulses, reducing energy consumption.**

## ABSTRACT

Noise immunity and energy efficiency of electronic devices is determined by the sub-system of synchronization and signaling. Disturbances are divided into two classes: external and internal. Reduction of the influence of external interference is based on the inclusion of protection of inputs and outputs of the chip. Long wires are divided into sections controlled by drivers-repeaters of signals for the suppression of internal interference.

This article describes methods of designing signal repeaters and output protection devices with regard to their impact on the parameters of developed chipset: prevention of interference, resistance to external interference such as electrostatic discharge, the transmission of signals without loss.

We propose original solutions for the implementation of the shapers of voltage pulses and transceiver devices such as "digital isolator".

The driver has a stable voltage pulse duration of the output signal fronts, if you change the reactive load.

Device Features such as "digital isolator" with the transfer by the cable line of high-frequency signal with to the phase shift keying provides data rates up to 100 Kbps. Electromagnetic Immunity is determined by split capacitor at the input of the "digital isolator".

## REFERENCES

- [1] Volovin G. "Drajvery silovykh kljuchej" sovremennaja jelektronika №8, 2007, s.32-40 (in Russian).
- [2] Timoshenkov V.P., Shalimov A.S., Timoshenkov A. S. "Vosstanovlenie impul'snyh signalov v kabel'nyh linijah svjazi" inzhenernyj vestnik dona, 2012, №4(chast' 2) (in Russian).
- [3] Adamov Ju.F., Gorshkova N. M., Stempkovskij A.L. Patent RF №2483437 "Formirovatel' impul'sov naprjazhenija s ustrojstvom zashhity ot otricateľ'nyh vybrosov pri podkljuchenii induktivnoj nagruzki" (in Russian).
- [4] Gorshkova N.M., Gubin Ja.S., Sibagatullin A.G. Patent RF №2308146 "Ustrojstvo zashhity vyvodov integral'nyh shem so strukturoj mdp ot jelektrostaticheskih razrjadov" (in Russian).
- [5] D.A. Kopev, V.A. Dmitriev "razrabotka monolitnyh integral'nyh shem peremennogo trakta" (in Russian).
- [6] URL: [http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2007\\_10\\_40.php](http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2007_10_40.php) (data obrashhenija: 25.02.2016) Preimushhestva primenenija sdvoennogo emkostnogo bar'era v novyh cifrovnyh izoljatorah Texas Instruments Pichugin S (in Russian).