

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И РАСЧЕТ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛОГИКИ

В.Н. Устюжанинов

Рассматривается способ формально-логического описания функционирования полупроводниковых структур силовых устройств в полях радиационных воздействий с применением аппарата математической логики. Предлагается методика получения расчетных оценок показателей радиационной стойкости для силовых ключей.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые ключи, радиационная стойкость, системный анализ стойкости.

Совершенствование электронных средств различного назначения сопровождается повышением степени интеграции не только на уровне электронной компонентной базы (ЭКБ), но и на уровне числа подсистем, реализуемых на кристалле или в корпусе микросхемы. Подобные тенденции становятся доминирующими, что находит свое отражение в понятиях «системы на кристалле» (СНК) и «системы в корпусе» (СВК).

Переход на новый уровень представления функциональной структуры электронных средств обуславливает необходимость формального определения основных системных понятий. Рассматривается вариант определения электронной системы, когда выполняются следующие условия:

- известны все элементы (подсистемы) в составе системы;
- определены свойства каждого элемента системы;
- известны правила (алгоритмы) взаимодействия элементов системы между собой в различных режимах функционирования системы.

Многовариантное определение каждого из перечисленных признаков обуславливает сложность реальных электронных систем. Следствием этого является неоднозначность традиционного определения надежности системы, особенно в условиях действия радиационных факторов. Системный подход к определению показателей надежности электронных средств подразумевает необходимость учета системных признаков объекта. Это означает, что надежность СНК или СВК должна определяться совокупностью показателей, число которых зависит от сложности системы. Расширение множества таких показателей обеспечивает более точное описание поведения системы в конкретных условиях. В прикладном плане это может означать, например, определение характеристик реакции системы в различных режимах функционирования на воздействие одного и того же внешнего фактора.

С учетом определения сложной системы, функционально-полные оценки радиационной стойкости электронной системы в полях излучений с известными спектрально-энергетическими характеристиками возможны лишь при условиях:

- известны количественные оценки показателей радиационной стойкости (ПРС) для каждой подсистемы,
- известны закономерности формирования системного ПРС, учитывающие алгоритмы функционирования и количественные оценки частных значений ПРС для взаимодействующих элементов системы.

Одним из результатов системного подхода к оценкам ПРС является вывод о неизбежности применения многоуровневых оценок стойкости, отражающих как свойства элементов системы, так и особенности взаимодействия их в процессе функционирования системы. Это условие по различным причинам часто не выполняется в прикладных исследованиях, когда за количественные оценки радиационной стойкости БИС принимаются показатели отдельных функциональных узлов (подсистем). Такая ситуация становится типичной по мере возрастания функциональной сложности электронных систем, что вызывает необходимость расширения аналитических исследований закономерностей функционирования и учета их при оценке стойкости систем в условиях действия внешних факторов.

Влияние системных факторов на стойкость СНК или СВК можно показать на простых примерах. Представляется очевидным, что ПРС системы, состоящей равностойких элементов с одинаковыми функциональными характеристиками (любые виды памяти), не может превышать значение ПРС отдельного элемента. Очевидно также, что усложнение функциональных отношений между равностойкими элементами однородной структуры электронной системы (например, увеличение разрядности шины), наряду с увеличением размерности структуры, сопровождается увеличением расхождений между ПРС элемента и системы. Предельным случаем проявления такой закономерности может служить эффект «зависания» компьютера, вследствие «конфликта на шинах», когда внешние воздействия любого вида отсутствуют. Повышение функционального и режимного разнообразия элементов функциональной структуры системы, при прочих равных условиях, может сопровождаться только понижением значения системного ПРС. Неограниченные пределы деградации системного

показателя стойкости обуславливают специфику проблем экспериментальных и теоретических исследований радиационной стойкости аппаратуры, СНК и СВК.

Закономерности функционирования цифровых электронных систем определяются правилами взаимодействия элементов функциональной структуры при поступлении информационных сигналов из окружающей среды. Разнообразие управляющих воздействий определяет сложность алгоритмов функционирования или поведения системы. Однако во всех случаях поведение цифровых структур рассматриваемого класса является детерминированным, т.е. предсказуемым, подчиняющимся определенным правилам. Это позволяет использовать аппарат математической логики для формального описания поведения системы, как в типовых режимных условиях функционирования, так и в условиях радиационных воздействий. Для этого целесообразно уточнить понятия логических переменных и логических функций применительно к рассматриваемой предметной области.

Известно [1], что любой логический базис – минимальный набор логических функций, достаточный для определения истинности или ложности событий произвольной сложности. При этом семантические признаки, т.е. содержательное описание событий, не учитываются, а сами события классифицируются по признакам «истинно» - «1» или «ложно» - «0». Присвоение простым событиям статуса двузначной логической переменной x_i , а сложным, т.е. являющимся следствием множества простых событий, - статуса логической функции Y_i позволяет формализовать, т.е. представить в виде логической функции, события произвольной сложности. Адаптация основных понятий, определений и теорем аппарата математической логики к задачам анализа и обеспечения радиационной стойкости цифровых электронных систем позволяет использовать теоретические основы этого аппарата для определения наиболее эффективных вариантов технических решений в конкретных условиях.

Предпосылками для формализации алгоритмов функционирования цифровой аппаратуры в радиационных условиях являются:

- представление информации, сигналов управления, команд, адресов и других атрибутов двоичным кодом,
- изменение числа различимых состояний Q цифровой системы по закону $Q = 2^n$, где n – число элементов в составе системы,
- возможность формализации отношений между радиационно-стимулированными событиями в виде неравенств « $<$ » или « $>$ » соответственно единичными и нулевыми значениями логических переменных, отображающими, например, информацию о наличии или отсутствии отказа функционального элемента системы.

Последняя из отмеченных особенностей иллюстрирует возможность учета и семантических признаков событий путем использования дополнительных логических переменных.

Одним из преимуществ аппарата математической логики применительно к задачам системных исследований является возможность использования различных эквивалентных способов адекватного представления событий в масштабах системы:

- структурно – логический в виде функциональной структуры системы с указанием функциональных характеристик элементов и связей между ними. Для цифровой аппаратуры такой подход реализуется в виде схемы электрической принципиальной или, в другом масштабе, схемы электрической соединений;
- формально-математический в виде системы уравнений, представленных с использованием операций одного или нескольких логических базисов;
- табличный в виде Таблицы истинности (состояний), устанавливающей формальные отношения между наборами значений логических переменных для каждого из Q различимых состояний системы и каждым значением из числа Y_i информационных выходов системы.

В сочетании с алгоритмами формального перехода от одного способа определения поведенческих характеристик системы к другому, многовариантное представление событий в электронных системах расширяет возможности информационного обеспечения, в частности для задач исследования поведения системы в условиях радиационных воздействий. Результаты радиационных испытаний могут быть представлены, начиная с уровня внешних воздействий, определяемого как показатель стойкости, в виде измененной таблицы истинности. Это влечет формально определяемое изменение математической модели, что, в свою очередь, сопровождается реконfigurацией структурной модели, отражающей модификацию алгоритма функционирования системы. Такие особенности позволяют рассматривать концепцию системного анализа и определения радиационной стойкости относительно сложной электронной аппаратуры как способ информационной оценки последствий обратимых или необратимых отказов при воздействии внешних факторов. Ранжирование отказов с использованием информационных критериев позволяет эффективнее решать прикладные задачи обеспечения надежности цифровых систем при воздействии радиационных факторов на стадии проектирования и принятия технических решений, а также в процессе разработки программы и норм испытаний.

Практическая реализация концепции системного анализа радиационной стойкости цифровых систем допускает использование различных логических базисов. Критерием выбора может служить

эффективность реализации возможностей математического обеспечения для различных базисов, а также наличие информационно-технологической поддержки в виде стандартного программного обеспечения компьютерных технологий. Анализ показал целесообразность использования базисных логических функций: «И» - конъюнкция или логическое умножение; «ИЛИ» - дизъюнкция или логическое сложение, «НЕ» - отрицание (инверсия логических состояний). Применительно к задачам анализа электронных систем используются следующие содержательные истолкования базисных функций:

- «И» - выходной сигнал (состояние выхода) функционального преобразователя является истинным, если истинны, т.е. имеют статус «1» все сигналы на его входах;
- «ИЛИ» - истинность логического состояния выхода элемента цифрового устройства поддерживается единичным значением хотя бы одного входного сигнала;
- «НЕ» - инверсия логических состояний входных или выходных сигналов.

В радиационных условиях обратимые или необратимые отказы цифровых электронных систем могут быть следствием различных эффектов:

- отказов в виде кратковременной инверсии логических состояний информационных сигналов на выходах надежных цифровых устройств из-за кратковременных отказов источников сигналов или каналов передачи информации;
- отказов в виде перемежающейся инверсии логических состояний выходов функциональных преобразователей вследствие отказов источников информации в виде «зависания» в единичном или нулевом состоянии и генерации соответствующих константных сигналов на одном или нескольких входах надежных функциональных преобразователей;
- обратимых или необратимых отказов в виде инверсии логических состояний как источников информации, так и устройств обработки информации, поступающей от различных источников.

Классификация видов отказов, как элемент концепции системного анализа радиационной стойкости цифровых структур и систем, позволяет, используя математическое, табличное или схемотехническое описание системы, определить элементы функциональной структуры с минимальным значением показателя стойкости к действию внешних факторов, т.е. решить задачу идентификации «слабого звена» в составе цифровой системы. Перспективы многовариантного решения подобных задач улучшаются с учетом особенностей электрических режимов функционирования, топологических и конструктивно-технологических характеристик элементов функциональной структуры электронных систем.

Методология системного анализа радиационной стойкости рассматривается на примере силового ключа *NPT IGBT* – типа [2]. На рис. 1 представлена эквивалентная схема $p^+ - n^- - p - n^+$ - структуры такого ключа с управлением режимом работы цепи базы силового $p^+ - n^- - p$ - транзистора МДП – ключом.

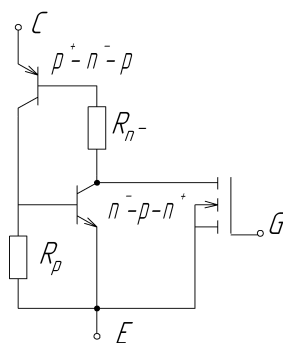


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема структуры силового ключа.

Функциональные свойства силового ключа реализуются совокупностью определенным образом взаимодействующих $p - n$ - переходов. С позиций формальной математической логики учитываются только свойство проводимости каждого элементарного ключа: замкнутое (проводящее) состояние – логическая единица, разомкнутое состояние – логический нуль. Количественные характеристики таких переходов относятся к числу семантических признаков, не влияющих на структуру и свойства логической модели. Такие ограничения обеспечивают возможность формализации цифровой структуры неограниченной сложности.

Преобразование эквивалентной схемы силового ключа в эквивалентную логическую схему возможно на основе модели транзистора в теории Эберса – Молла [3] для большого сигнала. В результате, каждый транзистор представляется двумя взаимодействующими $p - n$ - переходами. Проводящее («1») или непроводящее («0») состояние каждого из них определяют режим работы

транзистора, а на эквивалентной логической схеме отображаются соответственно замкнутым или разомкнутым ключом. На рис.2 представлена логическая модель силового ключа *NPT IGBT*, отображающая все возможные состояния элементов функциональной структуры, обуславливающих закрытое или открытое состояние ключа в типовых режимах функционирования.

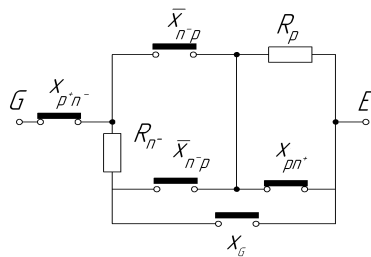


Рис.2. Эквивалентная логическая модель силового ключа *NPT IGBT* в радиационных условиях.

Из схемы рис.2 следует, что открытое состояние ключа может быть обеспечено четырьмя способами, представленными параллельными цепями, один из которых фактически используется в типовом режиме функционирования. Недействующие в типовом режиме ключевые цепи рассматриваются как «паразитные» элементы функциональной структуры, влияние которых может сказываться при отклонении от нормы электрических режимов или при воздействии внешних факторов.

Одним из преимуществ использования формально-логических моделей для анализа радиационных эффектов в структуре цифровых устройств является возможность однозначного определения всех механизмов развития отказов с учетом влияния скрытых в обычных условиях процессов в паразитных элементах. Открытое состояние силового ключа рис.1 соответствует нормальному активному режиму работы силового биполярного $p^+ - n^- - p$ - транзистора. На логической модели рис.2 такой режим представлен проводящим состоянием эмиттерного перехода X_{E_p} и закрытым состоянием коллекторного перехода $\overline{X_{C_p}}$ этого транзистора. Он обеспечивается открытым состоянием МДП – ключа X_G в цепи базы силового транзистора. Паразитный $n^+ - p - n^-$ транзистор представлен на логической модели рис.2 обратносмещенным коллекторным переходом $\overline{X_{C_n}}$ и прямосмещенным эмиттерным переходом X_{E_n} . Последовательность этих переходов образует паразитную цепь управления базой силового транзистора. Обратносмещенный переход $p - n^-$ образует второй паразитный канал управления режимом силового транзистора в радиационных условиях. На логической схеме рис.2 он представлен ключом $\overline{X_{pN}}$.

Отображаемые логической моделью рис.2 свойства силового ключа могут быть адекватно представлены таблицей состояний элементов функциональной структуры для включенного и выключенного состояния, как в типовом режиме функционирования, так и в условиях радиационных воздействий.

Таблица. Вариативные состояния $p - n$ – переходов структуры силового ключа *NPT IGBT*.

№	X_{C_p}	X_{C_n}	X_{E_n}	X_{NP}	X_G	I_{CE}	P_γ
1	0	0	1	0	0	0	0
2	1					1	0
3		1				1	0
4				1		1	0
5					1	1	0
6	1	1					$P_{\gamma 1}$
7		1		1			$P_{\gamma 2}$
8	1	1		1			$P_{\gamma 3}$

Свободные ячейки таблицы отображают события, когда состояние соответствующего перехода не влияет на состояние силового ключа. Комбинации (наборы логических переменных) с №1 по №5 отображают условия возможных сбоев (одиночных или необратимых) при отсутствии радиационных воздействий, т.е. обусловленных нарушениями электрических режимов функционирования. Типовой режим

функционирования ключа соответствует комбинациям №1 (выключен) и №5 (включен). Наборы №2 - №4 отображают события в виде прямого смещения отдельных переходов в структуре *NPT IGBT*. Очевидно, что прямое смещение может быть следствием действия не только режимных, но и радиационных факторов. При этом смена состояния каждого ключа будет происходить при различных интенсивностях радиационных воздействий.

Наборы состояний №6 - №8 отображают ситуации при воздействии радиационных факторов, когда происходит суммирование ионизационных токов различных обратносмещенных переходов. Переход в режим прямого смещения для каждой комбинации ключей происходит при различных уровнях интенсивностей воздействий, отображаемых в таблице соответствующими значениями мощности дозы $P_{\gamma i}$.

Представление событий в структуре силового ключа в условиях действия радиационных факторов в табличной форме позволяет перейти к математическому моделированию отказов. Для этого достаточно воспользоваться логическим базисом «И», «ИЛИ», «НЕ» и алгоритмом перехода от табличных данных к логической функции в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ) [1]. В результате условия перехода силового ключа *NPT IGBT* в проводящее состояние $Y = I_{CE} = 1$ определяются выражением

$$Y = X_{C_p} \vee X_{C_N} \vee X_{NP} \vee X_{C_p} \cdot X_{C_N} \vee X_{C_N} \cdot X_{NP} \vee X_{C_p} \cdot X_{C_N} \cdot X_{NP}, \quad (1)$$

где « \vee » - символ операции логического сложения ИЛИ - дизъюнкции, « \cdot » - символ операции логического умножения И - конъюнкции. Информационное наполнение математической модели (1) адекватно табличной форме определения свойств исследуемого объекта. Она определяет причинно-следственные связи перехода ключа в единичное (открытое) состояние, не учитывая количественные характеристики процессов. В частности, первые три слагаемые отражают возможность переключения силового ключа вследствие изменения состояния одного из переходов, рис.1, при воздействии радиационных факторов. Три других слагаемых учитывают возможные условия переключения в проводящее состояние в результате совместных событий изменения состояний нескольких переходов в различных сочетаниях.

Принципиальной особенностью аппарата математической логики является абстрагирование от содержательной стороны простых и сложных событий (процессов), когда оценка событий происходит только по признакам истинности или ложности. Однако такая особенность не исключает возможности и содержательной (количественной) интерпретации простых и сложных событий, что в технических приложениях позволяет разрабатывать алгоритмы и методики решения прикладных задач. В рамках рассматриваемого подхода для этого достаточно дополнить проводящее состояние разомкнутых в обычных условиях ключей, т.е. нулевые значения соответствующих логических переменных в Табл. и в уравнении (1), количественными оценками ионизационных токов в радиационных условиях. Это позволяет дополнить логические операции алгебраическими и ранжировать логические слагаемые в (1) по величине ионизационного тока, соотносима с каждой логической переменной и конъюнкциями различных переменных. В результате из (1) вытекает очевидное следствие

$$Y = X_{C_p} \cdot X_{C_N} \cdot X_{NP}. \quad (2)$$

Логическое уравнение (2) имеет содержательное истолкование: проводящее состояние силового ключа *NPT IGBT* – типа в радиационных условиях является следствием генерации ионизационных токов обратносмещенными в обычных условиях переходами X_{C_p} силового транзистора, X_{C_N} паразитного транзистора и X_{NP} - переходом база силового – база паразитного транзистора. Алгебраическое истолкование условия (2): смена состояния силового ключа возможна, если сумма ионизационных токов указанных переходов достигнет некоторого характеристического значения. Очевидно, что таким значением является ток базы силового транзистора при открытом состоянии МДП – ключа X_G в режимных условиях.

Рассматриваемая концепция системного анализа радиационной стойкости в общем случае применима к объектам неограниченной сложности. Эффективность ее реализации возрастает по мере увеличения объема начальной информации о конструктивно-топологических и системных характеристиках, а также алгоритмах и электрических режимах функционирования электронных средств различного назначения. Расширение возможностей расчетных методов оценки радиационной стойкости в рамках такого подхода обусловлено использованием фундаментальных теорем аппарата математической логики в сочетании с применением количественных характеристик для логических переменных и функций. Вариативность получаемых оценок стойкости с привязкой к топологическим и режимным параметрам, алгоритмическим характеристикам функционирования создает предпосылки для оптимизации технических решений с учетом параметров внешних воздействий.

Литература

1. **Поспелов Д.А.** Логические методы анализа и синтеза схем. Изд. 3-е, перераб. и доп., М., «Энергия», 1974. С. 386.
 2. **Устюжанинов В.Н., Фролова Т.Н.** Параметры силовых биполярных транзисторов в составе *NPT IGBT* в условиях воздействия ионизирующих излучений // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. Вып. 1-2. С. 24 – 28.
 3. **Степаненко И.П.** Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1967.
- ВАНТ, Вып.4, 2010. С. 5 – 9.