

Методология проектирования радиационно-стойких элементов для САПР электронно-компонентной базы типа «система-на-кристалле»

Чистяков М.Г.^{1*}, Назаров А.В.^{2}, Морозов С.А.^{1***}**

*¹Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,
Нахимовский проспект 36/1, Москва, 117218, Россия*

*²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,
Россия*

**e-mail: mlazex@gmail.com*

***e-mail: rat-rut@yandex.ru*

****e-mail: semorozov@rambler.ru*

Аннотация

В статье представлен базовый маршрут автоматизированного проектирования библиотеки стандартных комплементарных металл-окисел-полупроводниковых (КМОП) элементов, выполненных по технологии кремний-на-сапфире (КНИ) с минимальным топологическим размером 0,25 мкм, обеспечивающей гарантированный уровень радиационной стойкости. Апробирован комплекс программных средств, реализующий представленный маршрут и приведена методика проектирования конкретного библиотечного стандартного элемента.

Ключевые слова: маршрут проектирования, библиотека стандартных элементов, радиационная стойкость, сверхбольшая интегральная схема, система автоматизированного проектирования.

Введение

На бесперебойную работу радиоэлектронных устройств, установленных на космических аппаратах, особое воздействие оказывают поля ионизирующих излучений космического пространства, в том числе воздействие тяжелых заряженных частиц. Это и ряд других факторов воздействия на космических аппаратах были причиной того, что вначале они функционировали не более одного года. В настоящее время стоит задача обеспечения сроков активного существования космических аппаратов до пятнадцати лет.

Основные требования к внешним воздействующим факторам, предъявляемым к сверхбольшим интегральным схемам (СБИС) космического применения:

- минимальная наработка не менее 150000 часов при температуре эксплуатации $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- уровень стойкости к суммарной поглощенной дозе не менее 100 Крад (Si) – (рад – единица измерения интегральной дозы излучения);
- уровень стойкости к эффектам смещения (структурным повреждениям) от воздействия ионизирующих излучений космического пространства не

менее $5 \cdot 10^9$ протон/см² (для моноэнергетического потока протонов с энергией 10 МэВ);

- уровень стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц по эффектам «защелка», «выгорание», «пробой подзатворного диэлектрика» не менее 60 МэВ см²/мг;
- стойкость к климатическим и механическим воздействующим факторам (вибрация, удар и ускорение);
- работа в условиях пониженного давления 10^{-6} мм. рт. ст.

Высокие требования по надежности и радиационной стойкости в течение длительного срока эксплуатации СБИС космического применения требуют оценки и прогнозирования устойчивости их функционирования к радиационным воздействиям космического пространства [1]. Поскольку, в соответствии с действующими стандартами, разработка СБИС с повышенными показателями качества требует значительных затрат, производители интегральных схем перестали выпускать радиационно-стойкие изделия, в то время как средства разработки и отладки интегральных схем коммерческих уровней качества широко представлены на рынке электронных компонентов.

Новые вызовы, стоящие перед разработчиками элементной базы для космического применения при переходе отечественной интегральной технологии на субмикронный уровень, требуют серьезных исследований деградации элементной базы в более сильных электрических полях в условиях

радиации, а также применения новых конструктивно-технологических решений [3].

В последние годы для построения различных систем управления и контроля космических объектов, атомных энергосистем, исследовательских ядерных центров и других объектов применяются КМОП СБИС, разработанные и изготовленные по субмикронной технологии «кремний на изоляторе» [5].

В настоящее время по субмикронной технологии типа КМОП КНИ возможно реализовывать и коммерческие проекты, подобные «системе-на-кристалле», поскольку данный класс СБИС при невысокой стоимости выгоден еще и с точки зрения обеспечения минимальной потребляемой мощности, габаритов и веса. А для применения КНИ СБИС в космической аппаратуре найден ряд конструктивных решений, обеспечивающих их работоспособность в жестких условиях воздействия температур, механических нагрузок и различных видов радиационных воздействий [5].

В полной мере использовать возможности современной СБИС-технологии позволяет их проектирование на основе библиотек стандартных элементов, содержащих достаточно широкий набор элементов, начиная с элементарных логических функций, что позволяет достичь наилучших характеристик по производительности, потребляемой мощности и площади кристалла [2, 6].

Решение перечисленных задач на современном уровне невозможно без

соответствующего комплекса средств проектирования [5 – 7].

Предлагаемый метод. В статье предложена и апробирована структура сквозного маршрута автоматизированного проектирования библиотеки стандартных КНИ КМОП элементов с минимальным топологическим размером 0,25 мкм. Данный маршрут является частью комплекса средств проектирования, включающего систему автоматизированного проектирования, методологию и собственно маршрут проектирования с необходимыми программами верификации и *SPICE*-моделями базовых элементов, а также библиотеку стандартных элементов, разработанную для субмикронной КНИ технологии. Схема маршрута представлена на рисунке 1.

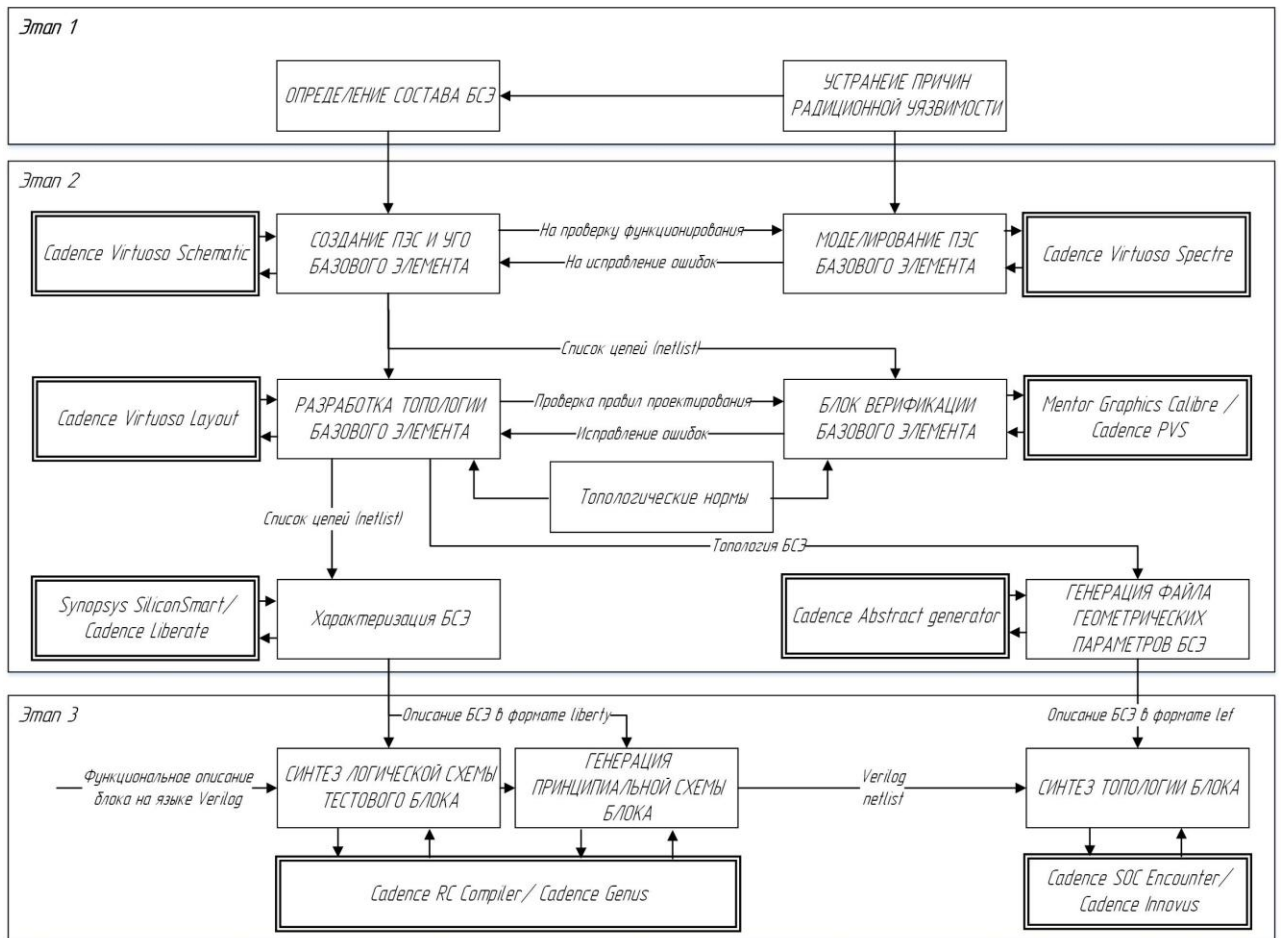


Рисунок 1 *Маршрут проектирования библиотеки стандартных элементов*

Этап №1 является предварительным этапом проектирования, на котором проводятся необходимые исследования и парирование конструктивно-технологическими методами эффектов радиационной уязвимости КМОП КНИ СБИС, выполненных по субмикронной технологии, таких как эффект накопленной дозы радиационного облучения, эффект, возникающий при воздействии тяжелых заряженных частиц [2]. Далее на этом же этапе определяется состав и схемотехнические решения для каждого элемента библиотеки стандартных элементов СБИС. На этапе 2 выполняется автоматизированное проектирование каждого библиотечного элемента для СБИС типа «система-на-кристалле» [6]. На заключительном, третьем этапе выполняется проверка созданных библиотечных элементов в составе тестового блока. Проверка использует данные по электрическим и геометрическим (конструктивным) описаниям каждого библиотечного элемента проекта, сгенерированным на предыдущем этапе разработки.

На втором этапе используются пакеты *Synopsis SiliconSmart* и *Cadence Abstract Generation*, а на третьем – пакеты *Cadence RC* и *Cadence SOC Encounter*.

Содержание второго этапа разработки отдельного библиотечного элемента проиллюстрируем на примере создания буфера, выполняющего функцию выравнивания фронтов и усиления входного сигнала. Вначале, в

блоке «Создание принципиальной электрической схемы и условно-графического обозначения базового элемента» в системе автоматизированного проектирования *Cadence* с использованием программы *Virtuoso Schematic Editor (VSE)*, создается принципиальная электрическая схема буфера, показанная на рисунке 2.

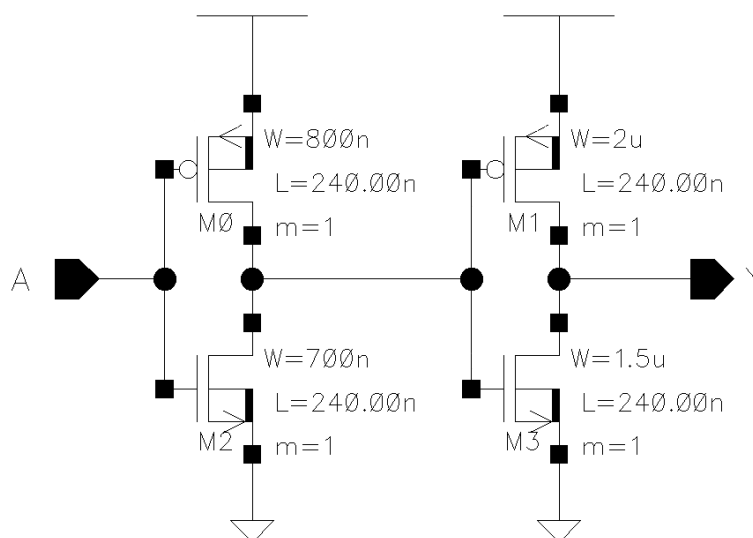


Рисунок 2 Схема электрическая принципиальная буфера

Завершает разработку «электрической» части буфера создание условно-графического его обозначения на принципиальной электрической схеме, которое выполняется в интерактивном режиме в программе *Virtuoso Symbol Editor*. Результат этого шага показан на рисунке 3.

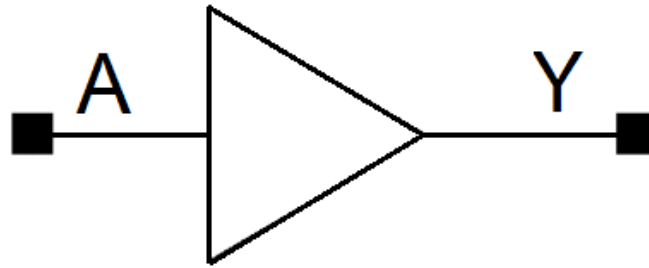


Рисунок 3 Условно-графическое обозначение буфера

Для электрического моделирования создается тестовая схема, приведенная на рисунке 4. В зависимости от необходимых для измерения параметров схема может корректироваться.

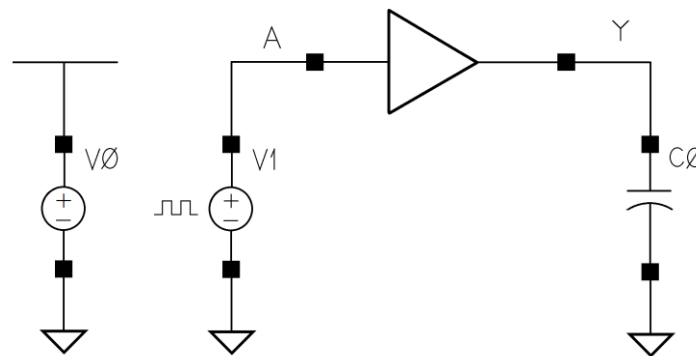


Рисунок 4 Схема электрическая принципиальная тестирования буфера

Моделирование в системе автоматизированного проектирования (САПР) *Cadence* выполняется программой *Analog Design Environment (ADE)*. Результаты моделирования представлены на рисунке 5. На этом этапе производится анализ схемотехнических решений, проверка правильности функционирования, оценка задержек элемента и оценка формы фронтов выходного сигнала. При необходимости вносятся корректировки в электрическую схему.

Список цепей (*netlist*) его электрической схемы передается в блок «*Разработка топологии библиотечного элемента*». Сюда же передается модель правил проектирования в виде *списка топологических норм*, которым должна удовлетворять топология библиотечного элемента. Кроме того, список *netlist* и список топологических норм проектирования передаются также в «*Блок верификации*».

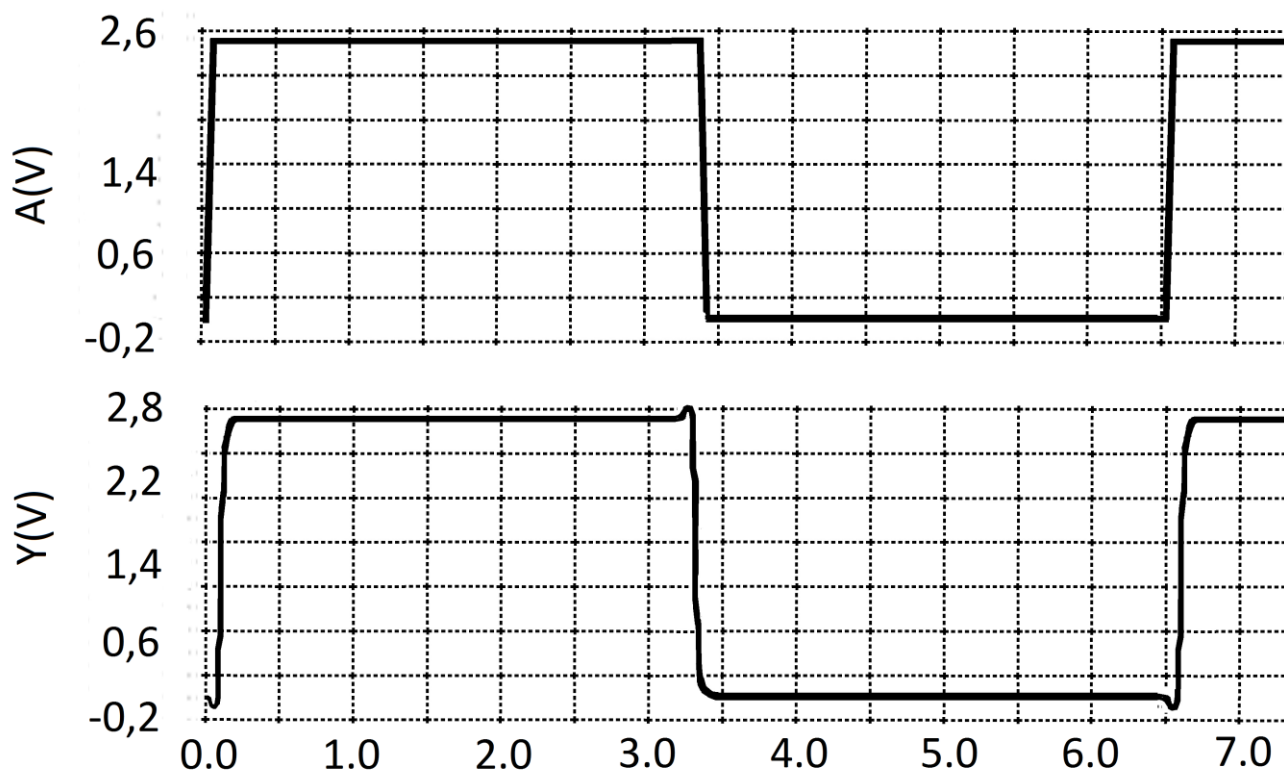


Рисунок 5 Временные диаграммы работы буфера

Разработка топологии выполняется с помощью инструментов программы *Virtuoso Layout Suite (VLS)* – результат этого шага представлен на рисунке 6.

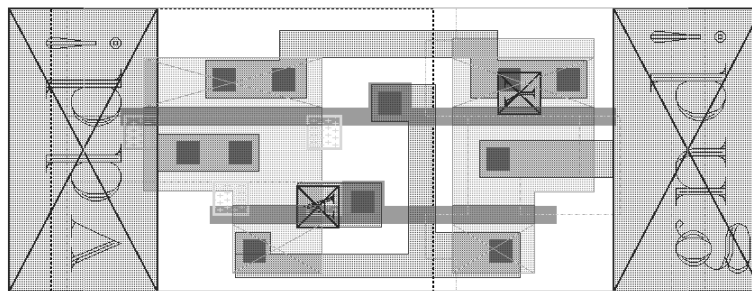


Рисунок 6 *Топология буфера*

В «Блоке верификации» топология буфера проверяется на выполнение проектировщиком топологических норм. Циклический процесс проверки вида «контроль/исправление» производится до полного исправления ошибок топологии библиотечного элемента. Эта часть работы выполняется при помощи САПР *Mentor Graphics Calibre DRC*, либо с помощью САПР *Cadence PVS DRC*.

Далее в том же «Блоке верификации» топология буфера проверяется на ее соответствие принципиальной электрической схеме буфера, то есть фактически на соответствие топологии библиотечного элемента элементам списка *netlist* вида «транзистор/контакт/цепь». Проверка выполняется при помощи модуля *Calibre LVS* САПР *Mentor Graphics*, либо САПР *Cadence PVS LVS*.

Если в результате проверок верификация элемента библиотеки подтверждается, то выполняется следующий этап контроля – выявление ошибок *стыковки элемента* с другими элементами при его реализации в составе тестового модуля. Для проведения этой проверки разрабатывается топология тестового модуля с помощью средств автоматического размещения.

Для использования САПР автоматической размещения и трассировки, необходимы электрические параметры элементов библиотеки стандартных элементов в формате *liberty*. Для этого используется САПР для характеристики *Synopsis SiliconSmart*, либо *Cadence Liberate*. Данный САПР использует электрические модели транзисторов и список соединений (файла *netlist*). Результирующий файл формата *liberty* содержит значения его задержек и потребляемой мощности при различных значениях входных параметров. Фрагмент электрического «паспорта» с временными параметрами библиотечного элемента представлен на рисунке 7.

В качестве исходных данных САПР этапов размещения и трассировки использует геометрические параметры элементов библиотеки стандартных элементов в формате *LEF (Layout Exchange Format)*. Исходные данные формируются с помощью модуля *Cadence Abstract Generator* в 3 этапа:

- извлечение параметров из топологического представления,
- обнаружение терминалов подключения библиотечного элемента (терминалы А и Y показаны на рисунке 5,
- формирование *абстрактного представления* библиотечного элемента с зонами, запрещёнными для разводки, и зонами подключения (*pin*), показанными на рисунке 8.

```

cell(BUFX2) {
  area : 34.2 ;
  cell_footprint : buf ;
  cell_leakage_power : 0.0303067 ;
  pin(A) {
    capacitance : 0.00504785 ;
    direction : input ;
    input_voltage : default ;
  }
  pin(Y) {
    direction : output ;
    function : "A" ;
    max_capacitance : 1.024 ;
    min_capacitance : 0.006 ;
    output_voltage : default ;
    timing() {
      related_pin : "A" ;
      timing_sense : positive_unate ;
      timing_type : combinational ;
      cell_fall(delay_template_9x9) {
        index_1("0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.6, 2");
        index_2("0.006, 0.04, 0.08, 0.128, 0.16, 0.256, 0.32, \
          0.512, 1.024");
        values("0.10178, 0.1538, 0.23044, 0.32166, 0.38132, 0.56335, 0.68384, 1.04814, 2.02751",\
          "0.10179, 0.18108, 0.25791, 0.35003, 0.41255, 0.59425, 0.7267, 1.08298, 2.06049",\
          "0.1124, 0.18109, 0.25792, 0.35004, 0.41256, 0.59426, 0.72671, 1.08299, 2.0605",\
          "0.11241, 0.1811, 0.25793, 0.35005, 0.41257, 0.59427, 0.72672, 1.083, 2.06051",\
          "0.11242, 0.18111, 0.25794, 0.35006, 0.41258, 0.59428, 0.72673, 1.08301, 2.06052",\
          "0.11243, 0.18112, 0.25795, 0.35007, 0.41259, 0.59429, 0.72674, 1.08302, 2.06053",\
          "0.11244, 0.18113, 0.25796, 0.35008, 0.4126, 0.5943, 0.72675, 1.08303, 2.06054",\
          "0.11245, 0.18114, 0.25797, 0.35009, 0.41261, 0.59431, 0.72676, 1.08304, 2.06055",\
          "0.11246, 0.18115, 0.25798, 0.3501, 0.41262, 0.59432, 0.72677, 1.08305, 2.06056");
      }
    }
  }
}

```

Рисунок 7 Файл *liberty* (Фрагмент описания задержек для буфера)

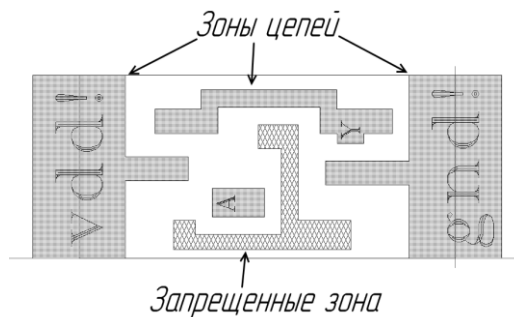


Рисунок 8 Модель абстрактного представления библиотечного элемента

Все полученные таким образом зоны объединяются в один результирующий *LEF* – файл, фрагмент которого приведен на рисунке 9.

```

MACRO BUF2
  CLASS CORE ;
  ORIGIN 0 0 ;
  FOREIGN BUF2 0 0 ;
  SIZE 3.8 BY 8.11 ;
  SYMMETRY X Y ;
  SITE CoreSite ;
  PIN A
    DIRECTION INPUT ;
    USE SIGNAL ;
    PORT
      LAYER MET1 ;
      RECT 0.86 4.11 1.45 5.24 ;
    END
  END A
  PIN gnd!
    DIRECTION INOUT ;
    USE GROUND ;
    SHAPE ABUTMENT ;
    PORT
      LAYER MET1 ;
      POLYGON 3.8 1 2.02 1 2.02 2.8 1.52 2.8 1.52
              1 0 1 0 -1 3.8 -1 ;
    END
  END gnd!

```

Рисунок 9 *Файл Library Exchange Format(Lef)*

(фрагмент описания выводов буфера)

Результатом второго этапа проектирования является набор файлов топологических и временных характеристик библиотечных элементов, необходимых для автоматизированного проектирования. Также в этот набор файлов включает набор технологических ограничений, применяемых при разводке.

На третьем этапе происходит тестирование библиотеки полученных файлов. Оно состоит из полного выполнения маршрута автоматизированного проектирования. Третий этап включает синтез из описания схемы на уровне регистровых передач (Register Transfer Logic – RTL) в описание схемы на уровне вентилей, размещение и трассировку библиотечных элементов, а также верификацию полученного проекта. Для проведения тестирования библиотечных

элементов данный этап повторяется с использованием тестовых описаний.

Выводы

В статье представлен базовый маршрут *автоматизированного проектирования* библиотеки стандартных КМОП-КНИ элементов с минимальным топологическим размером 0,25 мкм, обеспечивающей гарантированный уровень радиационной стойкости. Апробирован комплекс программных средств, реализующий представленный маршрут и приведена методика проектирования конкретного библиотечного стандартного элемента. Подробно описан каждый этап в сквозном цикле проектирования указанного библиотечного элемента, в качестве которого выбран часто используемый в цифровых схемах буфер. Его основным назначением является выравнивание фронтов и усиление входного сигнала. Приведены входные/выходные форматы и графическая иллюстрация результатов выполнения каждого этапа проектирования, а также описаны функции основных программ, реализующих эти этапы.

Библиографический список

1. Артюхова М., Жаднов В., Прохоров В., Полесский С. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании // Компоненты и технологии. 2010. №9. С.93–98.
2. Чистяков М.Г. Разработка топологической конструкции КНИ КМОП транзистора для проектирования СБИС специального назначения // Молодежный научно-технический вестник. 2016. №9. С. 21– 34.

3. Методы повышения радиационной стойкости интегральных микросхем НПО «ИНТЕГРАЛ», предназначенных для условий работы в космических летательных аппаратах: <http://www.1551a3.ru/datafiles/1817vf11.pdf>
4. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств / Под ред. В.А.Шахнова. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 500 с.
5. Глушко А.А. Моделирование субмикронных КНИ МОП-транзисторов Н-типа // Сборник трудов №8 молодых ученых, аспирантов и студентов. Информатика и системы управления в XXI веке. 2011. С. 154 – 163.
6. Бухтеев А., Морозов С., Соколов С. Структурные ASIC - виток эволюции БМК или готовая платформа для создания систем на кристалле // Chip News. 2004. № 8. С. 5-17.
7. Дембицкий Н.Л., Луценко А.В., Фам В.А. Экспертная система технологической подготовки процесса сборки и монтажа узлов бортовой радиоаппаратуры // Труды МАИ, 2015, №83:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62213>