УДК

Методика проектирования систем организации питания аналого-цифровых КМОП СБИС

В.Н. Котов[1,2], Д.И. Сотсков[1,2], Н.А. Усачев[1,2]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
[2]АО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва

Аннотация: в данной работе предложена методика проектирования систем организации питания для КМОП СБИС. Рассмотрены варианты исполнения базовых блоков систем организации питания, требования к ним и особенности их проектирования. В рамках верификации методики проектирования разработана система организации питания приемопередающей СБИС считывателя систем радиочастотной идентификации УВЧ-диапазона частот.

Ключевые слова: источник опорного напряжения, регулятор напряжения, источник опорного тока.

1. Введение

Проектирование современных аналогово-цифровых СБИС требует тщательной организации питания различных функциональных блоков и обеспечения их опорными напряжениями и токами с минимальным количеством шумов. Распределенные системы организации питания (СОП), решают проблемы просадок напряжения на одних блоках за счет функционирования других, длинных путей от регулятора напряжения до нагрузки, перекрестных помех. Также за счет возможности отключения некоторых регуляторов напряжения возможно существенно увеличить энергоэффективность СБИС [1].

С целью упрощения процедуры проектирования СОП в работе предложена инженерная методика. Методика позволяет выполнить поэтапное проектирование СОП и на основе требований к системе питания подобрать наиболее оптимальное схемотехническое решение.

2. Методика проектирования систем организации питания

Методика проектирования состоит из пяти основных этапов.

Этап I: разработка требований к системе организации питания.

- Разрабатываются требования по функционалу СОП: определяется количество выходов источника опорного напряжения (ИОН) с различными значениями напряжения (для дальнейшей разработки важно отметить наименьшее опорное напряжение из необходимых), количество регуляторов напряжения для обеспечения питания различных узлов СБИС, определяется необходимость наличия источников опорного тока и их полярность, необходимость наличия схемы мониторинга питания.
- Разрабатываются требования к параметрам блоков СОП: определяется диапазон рабочих температур, диапазон входных напряжений питания, а также требования к значениям параметров каждого из блоков СОП.

Этап II: проектирование источника опорного напряжения.

Для использования в составе СБИС наиболее подходящими по схеме построения являются классические ИОН на ширине запрещенной зоны с использованием операционного усилителя, имеющие множество схемотехнических вариаций [2].

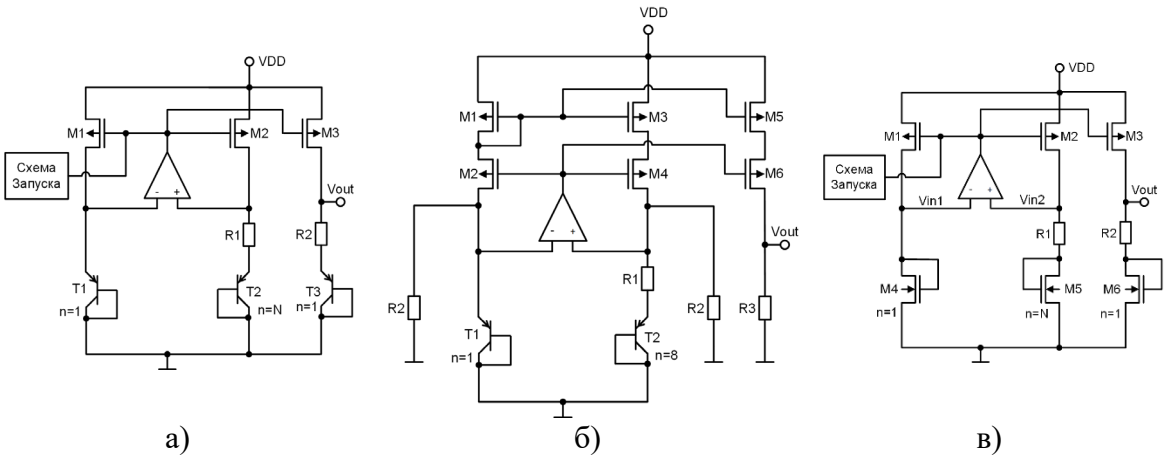
Данные схемы обеспечивают довольно высокие показатели стабильности по входному напряжению. Применение каскодных схем позволяет достичь широкого диапазона входных напряжений питания. Температурный коэффициент напряжения (ТКН) таких схем составляет, как правило, от 20 до 50 ppm/°C. Ядро данного типа ИОН может строиться на диодах, на биполярных транзисторах (в КМОП технологических процессах используются паразитные биполярные pnp- либо npn-транзисторы в зависимости от типа проводимости подложки), а также на n-канальных МОП-транзисторах в диодном включении.

- Выбор схемы построения ядра ИОН производится исходя из заданных требований к электрическим параметрам. Существует 2 подхода к построению ИОН: схема со сложением токов и схема со сложением напряжений с разными по знаку температурными коэффициентами [3].

Классическая схема ИОН на основе биполярных транзисторов со сложением напряжений (рисунок 1, а) генерирует опорное напряжение порядка 1,26 В [3], преимуществами данной схемы являются низкий ток потребления, простота конструкции.

Схема ИОН на основе биполярных транзисторов со сложением токов (рисунок 1, б) позволяет выбирать значение опорного напряжения в широком диапазоне, так как ее принцип работы основан на формировании опорного тока, который при помощи резистора преобразуется в выходное опорное напряжение необходимого уровня. Данная схема дополнительно удобна для применения в случае, когда необходима реализация источников опорного тока в составе СОП, так как для их создания достаточно будет отразить опорный ток из схемы ИОН с необходимым коэффициентом при помощи токовых зеркал.

Схема ИОН на основе n-канальных МОП-транзисторов в диодном включении (рисунок 1, в) позволяет снизить напряжение питания до значений 1 В и менее за счет работы в подпороговом режиме. Главным недостатком использования в качестве термочувствительных элементов n-канальных МОП-транзисторов является высокая чувствительность подпорогового режима к технологическому процессу [4], а, следовательно, опорное напряжение будет иметь значительный разброс как по пластине, так и от партии к партии. При этом стабильность выходного напряжения от температуры сохраняется и для решения проблемы достаточно на этапе производства предусмотреть подстройку выходного опорного напряжения.



а) б) в)

Рисунок 1. Варианты схемотехнической реализации ядра ИОН: а) схема на основе биполярных транзисторов со сложением напряжений, б) схема на основе биполярных транзисторов со сложением токов, в) схема на основе n-канальных МОП-транзисторов со сложением напряжений.

- Выбор схемы построения операционного усилителя (ОУ) рекомендуется производить исходя из внешней схемы ИОН. Источник тока и усилительные транзисторы дифференциальной пары ОУ целесообразно делать на транзисторах того же типа проводимости, как у источников тока в ИОН.

- Построение схемы запуска ИОН происходит в соответствии с одним из двух основных подходов. В первом варианте при помощи схемы запуска производится отслеживание протекания токов в ИОН в режиме реального времени, и при их отсутствии происходит принудительное открытие токорегулирующих транзисторов. После начала протекания токов схема запуска отключается от ИОН и не влияет на ее работу. Преимуществами данного подхода являются надежность и простота. Недостаток – необходимо постоянное протекание тока в схеме запуска для закрытия запускающего транзистора во время работы ИОН.

Во втором варианте при подаче питания, за счет конденсатора в схеме запуска, обеспечивается протекание токов в цепях ИОН, длительностью, достаточной для полноценного запуска всей схемы. После перезарядки конденсатора во время запуска происходит закрытие запускающих транзисторов и отключение схемы запуска. Данные схемы обязательно обеспечивается системой разрядки запускающего конденсатора после снятия напряжения питания. Преимущество – отсутствие потребления во время работы ИОН. Недостаток – больше нюансов проектирования, необходимо более тщательное моделирование для обеспечения корректной работы во всех режимах.

Этап III: проектирование источников опорного тока.

В случае использования схемы ИОН, основанной на принципе сложения токов, для получения опорного тока достаточно при помощи токовых зеркал отразить стабильный ток ИОН с необходимым коэффициентом.

В случае использования классической схемы ИОН, основанной на принципе сложения напряжений, для получения опорного тока необходимо получить 2 тока с различными по знаку температурными коэффициентами.

Ток, зависящий от температуры прямопропорционально, генерируется в цепях классической схемы ИОН. Ток, обратнопропорционально зависящий от температуры можно легко получить, используя схему на основе ОУ (рисунок 2). Регулируя номинал резистора R3 можно добиться максимальной температурной компенсации.

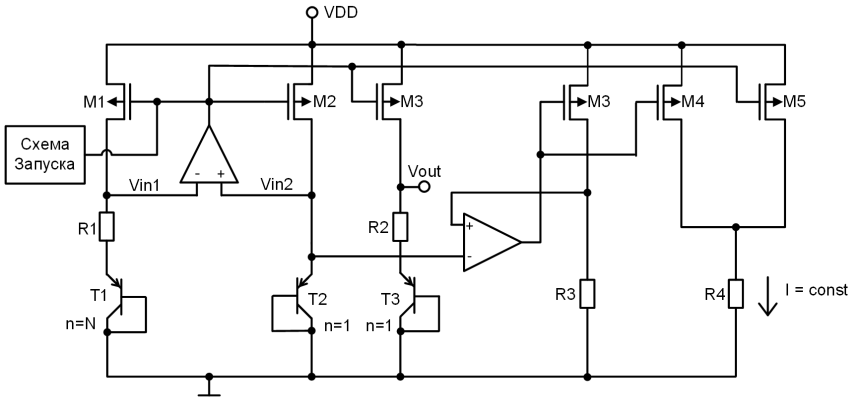


Рисунок 2. Вариант схемотехнической реализации источника опорного тока с использованием ИОН со сложением напряжений.

Этап IV: проектирование регуляторов напряжения.

Как правило, СОП для аналогово-цифровых СБИС имеют несколько регуляторов напряжения в своем составе. Разделяют регуляторы напряжения для цифровых блоков, для слаботочных аналоговых блоков, для мощных высокочастотных аналоговых

блоков усилителей, генераторов и т.д. для предотвращения влияния данных узлов схемы друг на друга. Данный подход позволяет применять разные напряжения питания для различных блоков СБИС.

Выполняют регуляторы напряжения на основе ОУ с широким p-канальным транзистором на выходе и обратной связью из резистивного делителя для формирования необходимого уровня напряжения на выходе регулятора напряжения (рисунок 3).

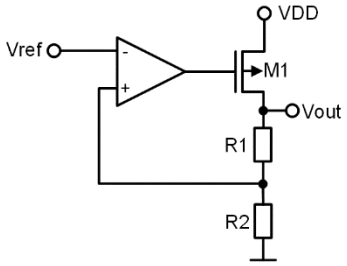


Рисунок 3. Вариант схемотехнической реализации классического регулятора напряжения.

Дифференциальный каскад ОУ для регуляторов напряжения строят на основе n-канальных транзисторов. Широкий выходной p-канальный транзистор регулятора напряжения является дополнительным каскадом усиления, за счет чего, часто может быть достаточно использования дифференциального каскада в качестве ОУ. Важно при проектировании обеспечить устойчивость регулятора напряжения во всем диапазоне возможного тока нагрузки.

Этап V: проектирование схемы мониторинга питания.

Схема мониторинга питания должна оповещать систему об успешном запуске системы питания и готовности работы, а также о различных проблемах с питанием, например, низком уровне заряда батареи для экстренного завершения работы системы или сигнализации о необходимости замены/заряда элементов питания.

Наиболее простым критерием нормального функционирования схемы организации питания является нормальное регулирование выходного напряжения регуляторами напряжения. За счет сравнения потенциала на затворе выходного транзистора регулятора напряжения с некоторым постоянным потенциалом схемы (выбирается индивидуально) при помощи компаратора напряжения возможно определять факт нормального регулирования выходного напряжения и при помощи логических компонентов формировать сигнал, информирующий о корректной работе схемы.

3. Апробация методики проектирования систем организации питания

В результате апробации представленной методики проектирования была разработана масштабируемая СОП приемопередающей СБИС по КМОП-технологии с проектными нормами 180 нм, включающая ИОН с выходом на 1,225 В, источник опорного тока на 50 мкА и регулятор напряжения на 1,8 В.

Значения параметров разработанной СОП приемопередающей СБИС приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметров СОП приемопередающей СБИС

Функциональный блок СОП	**Наименование параметра, единица измерения**	**Обозначение параметра**	**Значение параметра**
-	Диапазон напряжений питания, В	$U_{ПИТ}$	2,0…4,6
	Ток потребления, мкА	$I_{ПОТР}$	не более
ИОН	Выходное напряжение, В	$U_{ВЫХ_ИОН}$	1,223…1,227
	Нестабильность по входному напряжению, мВ/В	$K_{U_ИОН}$	0,48
	Температурный коэффициент выходного напряжения, ppm/°C	$\alpha U_{ВЫХ_ИОН}$	31
	Коэффициент подавления пульсаций напряжения питания, дБ	$PSRR_{ИОН}$	55
Источник опорного тока	Выходной ток, мкА	$I_{ВЫХ}$	50
	Температурный коэффициент выходного тока, ppm/°C	$\alpha I_{ВЫХ}$	92
Регулятор напряжения	Выходное напряжение, В	$U_{ВЫХ_РН}$	1,79…1,81
	Нестабильность по входному напряжению, мВ/В	$K_{U_РН}$	1,1
	Нестабильность по выходному току, мВ/А	$K_{I_РН}$	35
	Температурный коэффициент выходного напряжения, ppm/°C	$\alpha U_{ВЫХ}$	31
	Коэффициент подавления пульсаций напряжения питания, дБ	$PSRR_{РН}$	53

Примечание: диапазон рабочих температур составляет от минус 60 до 125 °C

4. Заключение

В данной работе предложена методика проектирования систем организации питания (СОП) для аналого-цифровых КМОП СБИС, позволяющая систематизировать процесс разработки СОП, обеспечивая выбор оптимальных схемотехнических решений на основе заданных параметров. Методика может быть применена при проектировании широкого класса СБИС, включая устройства с жесткими ограничениями по энергопотреблению и уровню шумов.

Список литературы

1. H. Li et al., "Energy-Efficient Power Delivery System Paradigms for Many-Core Processors," in IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 36, no. 3, pp. 449-462, March 2017, doi: 10.1109/TCAD.2016.2584056.
2. Rincon-Mora, G. A. Voltage References: From Diodes to Precision High-Order Bandgap Circuits // Wiley, 2002. – 352 p.
3. P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, and R. G. Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits", 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
4. Enz, C. C., Vittoz, E. A. Charge-Based MOS Transistor Modeling // Wiley, 2006.