

РАЗРАБОТКА ГЕТЕРОГЕННЫХ СХЕМ ДЛЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

© 2009 С.М. Крылов, М.В. Сараев, Е.Н. Гребенщиков

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 16.11.2009

В статье рассматриваются некоторые подходы к разработке и проектированию различных аналого-цифровых систем на кристалле на основе нового междисциплинарного научного направления - «Объединённой формальной технологии» (ОФТ)

Ключевые слова: *общая теория систем, гетерогенные системы, функциональные блоки, аналого-цифровые системы на кристалле, схемы коррекции смещения нуля*

В работе [1] рассмотрены методы представления различных моделей объектов и систем, основанные на формально-технологическом подходе [2]. Кратко суть предложенного в [1] подхода заключается в том, что любой элемент или объект a_i может быть представлен математической моделью в виде совокупности двух множеств: $a_i = \langle \gamma_{pi}, M_{fi} \rangle = \langle \{ \gamma_{i0}, \gamma_{i1}, \dots, \gamma_{in} \}, \{ \gamma_{ij} = \varphi_j(\gamma_{is}, \dots, \gamma_{jk}); \dots; \gamma_{ir} = \varphi_r(\gamma_{ib}, \dots, \gamma_{ml}) \} \rangle$, где γ_{pi} – список параметров $\{ \gamma_{i0}, \gamma_{i1}, \dots, \gamma_{in} \}$, отображающих свойства данного элемента a_i на числовую ось (или на другую, заранее оговариваемую, нечисловую шкалу), $M_{fi} = \{ \gamma_{ij} = \varphi_j(\gamma_{is}, \dots, \gamma_{jk}); \dots; \gamma_{ir} = \varphi_r(\gamma_{ib}, \dots, \gamma_{ml}) \}$ – список функциональностей, относящихся к этим свойствам. Состояние элемента a_i – это конкретное значение всех параметров γ_{pi} – то есть конкретное значение соответствующего вектора Γ_i . Такое унифицированное математическое представление объектов легко позволяет переносить их практически в любую компьютерную среду, поддерживающую объектно-ориентированное программирование (ООП) для проведения различных модельных компьютерных экспериментов, испытаний и аналитических расчётов, и, кроме того, коррелирует с концепциями «алгебры физических взаимодействий» Е.М. Карпова [3]. В работе [4] аналогичные подходы предложены для описания различных гетерогенных компонентов микроэлектронных схем в современных многофункциональных программируемых аналого-цифровых системах на кристалле (МПАЦ СНК). В соответствии с этим подходом в табл. 1 при-ведены различные возможные сочетания

основных типов входных и выходных электрических сигналов и параметров, наиболее часто используемых для представления какой-либо информации в микроэлектронных системах.

Табл. 1, разумеется, не является исчерпывающей, поскольку с теоретической точки зрения возможны и другие, достаточно экзотические типы электрических сигналов и параметров, способных кодировать и передавать информацию. Тем не менее, табл. 1 достаточно представительна, поэтому в первом приближении можно ограничиться ею. Общее число Γ гетерогенных сочетаний вход-выход, согласно табл. 1, равно:

$$\Gamma = n^2 - n = 210, \quad (1)$$

где n – общее число рассматриваемых гетерогенных сигналов и параметров.

В тоже время число гомогенных сочетаний H , согласно той же таблице, равно:

$$H = n = 15, \quad (2)$$

то есть в $\Gamma/H = 210/15 = 14$ раз меньше. Ясно, что эффективное освоение возможностей, предоставляемое использованием гетерогенных ФБ при построении различных электронных систем, включая МПАЦ СНК, существенно расширяет поле потенциальных схемотехнических решений, что позволяет надеяться на получение систем с улучшенными техническими характеристиками.

В современных электронных системах, включая МПАЦ СНК, соответствующие типы сигналов и параметров табл. 1 реализуются самыми различными функциональными блоками и компонентами. Например, фирма *Sypress Semiconductor* в одной из наиболее удачных своих разработок – в программируемой МПАЦ СНК типа *PSoC*, использует аналоговые конфигурируемые блоки двух

*Крылов Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники
Сараев Михаил Владимирович, аспирант
Гребенщиков Евгений Николаевич, лаборант кафедры вычислительной техники*

типов – «непрерывные» без коррекции $E_{см.0}$ и на переключаемых конденсаторах с автонулением [5]. При этом максимальная погрешность $E_{см.0}$ одного непрерывного блока достигает 10-30 мВ при полосе пропускания до 5,4 МГц [6], тогда как максимальная частота сигнала, обрабатываемого блоками на

переключаемых конденсаторах (из-за импульсного режима работы) как минимум на порядок меньше и требует тщательной дополнительной настройки режимов работы для сглаживания неизбежных пульсаций выходного сигнала.

Таблица 1. Сводная таблица возможных сочетаний вход-выход для электрических сигналов и параметров.

Вх/ Вых	U_c	I_c	U_a	I_a	U_ϕ	I_ϕ	U_d	I_d	U_h	I_h	U_c	I_c	R	C	L
U_c	-	Γ_T													
I_c	Γ_T	-	Γ_T												
U_a	Γ_T		-	Γ_T											
I_a	Γ_T	Γ_T	Γ_T	-	Γ_T										
U_ϕ	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	-	Γ_T									
I_ϕ	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	-	Γ_T								
U_d	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	-	Γ_T							
I_d	Γ_T	-	Γ_T												
U_h	Γ_T	-	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T							
I_h	Γ_T	-	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T								
U_c	Γ_T	-	Γ_T	Γ_T	Γ_T	Γ_T									
I_c	Γ_T	-	Γ_T	Γ_T	Γ_T										
R	Γ_T	-	Γ_T	Γ_T											
C	Γ_T	-	Γ_T												
L	Γ_T	-													

Примечание: U – сигналы напряжения, I – тока, R – величина сопротивления, C – величина ёмкости, L – величина индуктивности. Подстрочными буквами обозначены: ц - цифровые сигналы, а - аналоговые, ф - фаза сигнала, д - длительность импульсного сигнала, h - амплитуда импульса, ч - частота сигнала, пробел – гомогенное сочетание входных и выходных сигналов и (или) параметров, Γ_T - гетерогенное сочетание вход-выход

Очевиден вопрос – нельзя ли научиться конструировать аналого-цифровые (АЦ) блоки для МПАЦ СНК так, чтобы максимально использовать достоинства различных гетерогенных компонентов для улучшения всех основных характеристик таких блоков? Сводя вместе различные источники, описывающие различные компоненты электронных схем [7, 8] и учитывая особенности изготовления различных АЦ элементов КМОП-БИС по планарным технологиям [9], рассмотрим такого рода преимущества и недостатки на ограниченном числе наиболее массовых ФБ различного типа. Соответствующая информация представлена в табл.2.

Из табл. 2 хорошо видно, что различные типы ФБ имеют различные преимущества и

недостатки при их использовании в МПАЦ СНК. Например, достаточно просто и эффективно реализуются схемы токовых зеркал, но они работают только с аналоговыми токовыми сигналами. Аналоговые ключи, то есть переключатели сигналов напряжения или микроамперных токов (на базе небольших и поэтому достаточно высокоомных МОП-транзисторов), имеют низкую сложность при своей реализации и занимают небольшие площади кристалла. Точные наборы «взвешенных» микро-ёмкостей (уровень десятков сотен фемто-фарад), и ряд других компонентов достаточно эффективно реализуются в современных технологиях производства микросхем [7, 9].

Таблица 2. Параметры и качественные характеристики различных АЦ ФБ при реализации в составе МПАЦ СНК

Тип ФБ	Тип по табл.1	Сложность	Автонастр. Есм.0	Площадь, в у.е.	Точность или Есм.0, мВ	Макс. число функций
резистор R	I_a/U_a U_a/I_a	низк.	нет	$k_p k_T k_R R$	20%	2
емкость C	U_a/U_h U_h/U_h	низк.	нет	$k_p k_T k_C C$	10%	2
МОП-транзистор	U_a/R	низк.	нет	$1 k_p k_T$	-	1
RS-триггер с занесением	$U_{ц}/U_{ц}$	сред.	нет	$18 k_p k_T$	-	1
регистр на m разрядов	$U_{ц}/U_{ц}$	сред.	нет	$18m k_p k_T$	-	1
непрер. ДОУ	U_a/U_a	сред.	нет	$k_p k_T 1000$	± 10	2
ДОУ на ПК (PSoC)	U_a/U_h	сред.	есть	$K_p k_T 1240 + k_C C_{oc}$	± 1	5
непрерывный компаратор	$U_a/U_{ц}$	сред.	нет	$k_p k_T 1000$	± 10	1
компаратор на ПК	$U_a/U_{ц}$	сред.	есть	$k_p k_T 1200$	± 1	1
симметричное токовое зеркало	I_a/I_a	низк.	нет	$K_p k_T 2 + k_p k_T k_R R$	10%	1
ЦАП на токовом зеркале на m разрядов	$U_{ц}/I_a$	сред.	нет	$k_p k_T (2^{m+1} + 1) + k_p k_T k_R R$	10%	1
2-х-полярный токовый ЦАП на m разрядов	$U_{ц}/I_a$	сред.	нет	$k_p k_T (2^{m+2} + 2) + k_p k_T k_R R$	10%	2
цифровой инвертор	$U_{ц}/U_{ц}$	низк.	-	$k_p k_T 2$	-	1
ключ КМОП	$U_{ц}/U_a$ $U_{ц}/I_a$	низк.	-	$k_p k_T 4$	-	1
полный двоичный дешифратор на m входов	$U_{ц}/U_{ц}$	сред.	-	$k_p k_T (2m + 2^{m+1}(m+1))$	-	1
ЦАП на сетке 2^m -R на m разрядов	$U_{ц}/I_a$	выс.	нет	$k_p k_T (2m + 2^{m+1}(m+2)) + 2^m k_p k_T k_R R$	20% е.м.з.р	1
2-х-полярный ЦАП на сетке 2^m -R на m разрядов	$U_{ц}/I_a$	выс.	нет	$k_p k_T (2m + 2^{m+1}(m+2)) + 5k_{p2} k_T + 2^m k_p k_T k_R R_1 + k_p k_T k_R R_2$	20% е.м.з.р	2

Примечания: за единицу площади принимается площадь, занимаемая «единичным» элементом – МОП-транзистором (размером 1×1 мкм²), поэтому коэффициенты в формулах имеют следующий смысл: k_p – коэффициент, связывающий площадь (мощность) «единичного» элемента и того, который необходим в данной конкретной схеме (при увеличении мощности размеры элемента увеличиваются); k_T – коэффициент, связывающий текущую расчётную площадь элемента с его реальной площадью, занимаемой на кристалле (то есть с учётом дополнительной пустой поверхности кристалла); k_R – коэффициент, связывающий сопротивление резистора величиной в одну единицу, с его длиной, R – величина резистора в принятых единицах, k_C – коэффициент, связывающий ёмкость конденсатора величиной в одну единицу, с его площадью, C – ёмкость конденсатора в принятых единицах; R – величина одного резистора в сетке ЦАП типа 2^m -R на m разрядов; R_1, R_2 – величины резисторов в сетке двухполярного ЦАП типа 2^m -R на m разрядов и в цепи задатчика тока двухполярного токового зеркала для этого ЦАП соответственно, k_{p2} – коэффициент, связывающий площадь (размеры) транзисторов токового зеркала двухполярного ЦАП с площадью «единичного» элемента.

RS-триггер с занесением реализован на 4-х логических элементах типа 2И-НЕ плюс инвертор; в качестве непрерывного ДОУ взята схема ДОУ из [10]; ДОУ на ПК содержит набор взвешенных емкостей и емкостей обратной связи, эквивалентных емкостям ДОУ на ПК групп А и F в PSoC [6]; компаратор на ПК содержит непрерывный ДОУ из [10] и цепи автонуления с одним инвертором, тремя аналоговыми КМОП-ключами и емкостью автонуления около 200 фемто-Фарад (фФ); токовые ЦАП представляют собой двоично-взвешенные цифро-управляемые источники тока на основе токовых зеркал; двухполярный ЦАП типа 2^m -R, помимо резистивной сетки, содержит разнополярные токовые ЦАП.

Рассмотрим один из возможных вариантов синтеза гетерогенной схемы коррекции напряжения смещения нуля $E_{см.0}$ инвертирующего непрерывного ДООУ, классическая схема коррекции $E_{см.0}$ которого представлена на рис. 1.

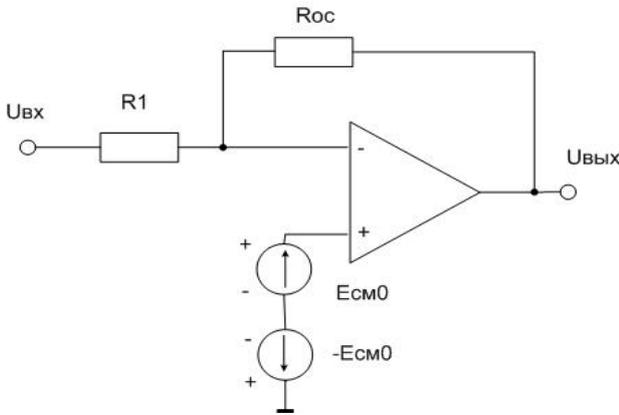


Рис. 1. Инвертирующий усилитель на базе ДООУ со схемой коррекции его $E_{см.0}$

Суть коррекции по классической схеме заключается в том, что для компенсации влияния $E_{см.0}$ самого ДООУ используется включенный последовательно с ним компенсирующий источник $E_{см.0}$, фактически устраняющий влияние первого (рис. 1). Если в качестве компенсирующего источника использовать классический m -разрядный разнополярный ЦАП на последовательной сетке одинаковых резисторов типа 2^m -R, то, согласно табл. 2, занимаемая им площадь кристалла $C_{корр}$ будет равна:

$$C_{корр} = k_p k_T (2m + 2^{m+1}(m+2)) + 5k_p k_T + 2^m k_p k_T k_R R_1 + k_p k_T k_R R_2 + 18m k_p k_T, \quad (1)$$

что при значениях $m=4$, $k_p=1=k_{p2}$, $k_T=2$, $k_R=2$ кОм^{-1} (из [9]), $R_1=1$ кОм ; $R_2=10$ кОм даст $C_{корр}=660$.

Если же использовать гетерогенный блок, например, ЦАП на токовых зеркалах с двухполярным токовым выходом на те же m разрядов с хранящим код коррекции аналогичным m -разрядным регистром, причём в качестве конвертора типа I_a/U_a (см. табл. 1 и [4]) использовать низкоомный резистор (табл. 2), то для его реализации потребуется примерно $C_{корр2}$ единиц площади:

$$C_{корр2} = k_p k_T (2m + 2 + 2) + k_p k_T k_R R + 18m k_p k_T + k_p k_T k_R r, \quad (2)$$

что при тех же значениях параметров ($r=100$ Ом , $R=R_2$) даст $C_{корр2}=317$.

Сравнивая (1) и (2), получаем, что уже

при $m=4$ вариант (2) имеет существенные преимущества перед (1).

Выводы: выдвинутое в настоящей статье и в работе [4] предположение о том, что учёт различных положительных качеств различных гетерогенных ФБ в сравнении с возможностями только гомогенных ФБ существенно расширяет поле эффективных решений актуальных задач современной микроэлектроники, в частности, в области МПАЦ СНК, находит своё вполне конкретное подтверждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Крылов, С.М. Формально-технологические модели в общей теории систем. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2003. – Т.5, №1. – С. 83-90.
2. Крылов, С.М. Формальная технология и эволюция. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 384 с.
3. Карнов, Е.М. Об алгебре физических взаимодействий. В кн.: Математическое обеспечение САПР (Межвуз. сб. научн. трудов). Куйбышев: КуАИ, 1989. – С. 20-29.
4. Крылов, С.М. Синтез конфигурируемых блоков для аналого-цифровых систем-на-кристалле с использованием гетерогенных функциональных компонентов. / С.М. Крылов, М.В. Сараев // Вестник Самарского государственного технического университета, Серия технические науки. – 2007. - № 2 (20). – С. 58-63.
5. Mar, M. An Architecture for a Programmable Mixed-Signal Device / M. Mar, B. Sullam, E. Blom // In: IEEE 2002 Custom integrated circuits conference. 0-7803-7250-6/02/. – P. 55-58.
6. PSoC Mixed Signal Array. Final Data Sheet. CY827143, CY827243, CY827443, CY827543, and CY827643. - Cypress Semiconductor Corp., 2002-2006. Document No. 38-12012 Rev. *К
7. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир, 1983.
8. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. – М.: издательский дом «Додэка – XXI», 2005. – 530 с.
9. Николаев, И.М. Интегральные микросхемы и основы их проектирования: Учебник для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. / И.М. Николаев, Н.А. Филинюк. – М.: Радио и связь, 1992. – 424 с.: ил.
10. Analogue Circuits II. Exam 21.11.2003. University of Oulu. Electrical and Information Engineering. Электронный ресурс: <http://www.ntsai.oulu.fi>

DESIGN OF HETEROGENEOUS CIRCUITS FOR ANALOG-DIGITAL SYSTEMS-ON-CHIP

© 2009 S.M. Krylov, M.V. Saraev, E.N. Grebenshikov

Samara State Technical University

The paper deals with some approaches to the design of various analog-digital systems-on-chip based on the new interdisciplinary scientific direction called General Formal Technology (GFT).

Key words: general theory of systems, heterogeneous systems, functional blocks, analog-digital systems on a crystal, schemes of correction of zero displacement