

На правах рукописи

Тутышкин Александр Андреевич

Реализация малопотребляющих КМОП фильтров на переключаемых конденсаторах на основе токовых конвейеров

Специальность 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника и телекоммуникации» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор А.С.Коротков

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор А.В.Бондаренко

кандидат технических наук,
доцент В.Г.Красов

Ведущая организация:

ОАО «Супертел»

Защита состоится 2 декабря 2004 г. в _____ на заседании диссертационного
Совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, 2-ой учебный корпус, ауд.
470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «___»

2004 г.

И.О. ученого секретаря
наук,
диссертационного Совета Д 212.229.01

доктор физико-математических
профессор А.И.Титов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С увеличением степени интеграции микроэлектронных схем обозначилась тенденция к уменьшению потребляемой мощности радиоэлектронной аппаратуры. В то же время, при реализации телекоммуникационных систем, таких как WLAN, DECT и Bluetooth, необходимо использовать аналоговые частотно-избирательные устройства с расширенным диапазоном рабочих частот, в частности, фильтры нижних частот (ФНЧ) с полосой пропускания от 1 МГц. Также, реализация устройств обработки сигналов, совмещающих на одном кристалле аналоговую и цифровую часть (System-on-Chip), требует уменьшения физических габаритов основных узлов. При реализации цифровых устройств обработки сигналов в подавляющем большинстве случаев используется КМОП-технология. В связи с этим аналоговая часть реализуемого устройства должна быть также выполнена по КМОП-технологии. Одной из важнейших составляющих аналоговой части являются частотно-избирательные устройства (ЧИУ). В КМОП-исполнении используются следующие классы ЧИУ: фильтры на переключаемых конденсаторах (switched capacitors, SC-фильтры) и фильтры, построенные на транскондуктивных усилителях (так называемые Gm-C фильтры). Каждый из описанных классов активных ЧИУ имеет свои преимущества и недостатки. Реализация Gm-C фильтров требует включения в состав ЧИУ схемы автоподстройки параметров входящих в фильтр транскондуктивных усилителей (ТУ). Вследствие этого увеличиваются потребляемая мощность, занимаемая на кристалле площадь, а также усложняется разработка фильтра.

Прецизионные фильтры на переключаемых конденсаторах на основе операционных усилителей могут быть реализованы без схемы автоподстройки. Это связано с тем, что постоянные времени фильтра определяются отношениями величин конденсаторов, которые могут быть выдержаны в КМОП-технологии с точностью не ниже 1%. Следовательно, упрощается процесс разработки ЧИУ, уменьшаются занимаемая на кристалле площадь и потребляемая мощность. Однако такой подход оправдан при реализации фильтров с рабочими частотами, не превышающими 150–200 кГц. Это связано с тем, что при реализации схем с более высокими рабочими частотами необходимо использование ОУ с повышенной площадью усиления (более 10–12 МГц), что существенно увеличивает потребляемую мощность и занимаемую фильтром площадь на кристалле.

Ограничения, имеющие место при реализации описанных классов ЧИУ, стимулируют поиск принципиально новых путей реализации фильтров с расширенной полосой рабочих частот. В этой связи представляется перспективным переход к обработке сигналов не в базисе напряжений, а в базисе токов. Для построения схем, работающих в базисе токов, необходима соответствующая элементная база. В базисе токов одним из основных схемотехнических элементов является так называемый токовый конвейер второго поколения (second generation current conveyor – ССII). По принципу работы ССII в идеализированном случае представляет собой комбинацию повторителя напряжения и повторителя тока. Поскольку в схеме нет каскадов с большим коэффициентом усиления, то нет необходимости в подключении корректирующей цепи, что позволяет добиться расширения частотного диапазона, даже при малых напряжениях питания.

Принимая во внимание преимущества схем на переключаемых конденсаторах и токовых конвейерах, представляется перспективной реализация ЧИУ на переключаемых конденсаторах с использованием в качестве активных элементов токовых конвейеров. Такой подход должен иметь следующие преимущества: во-первых, SC-реализация, в отличие от Gm-C-реализации, дает возможность не включать в фильтр схему автоподстройки, во-вторых, использование токового конвейера позволяет расширить частотный диапазон до единиц мегагерц без существенного увеличения потребляемой мощности, занимаемой площади и ухудшения динамических свойств.

При решении задачи синтеза SC-фильтров, как правило, используется метод операционной имитации. Основными достоинствами метода являются: низкая чувствительность характеристик фильтров к разбросу значений элементов, низкая чувствительность к влиянию паразитных емкостей, входящих в состав элементов (электронных ключей, ОУ, ССII), эффективная перестройка параметров фильтра изменением тактовой частоты. Основным базовым блоком для построения фильтра высокого порядка является SC-интегратор. Поэтому, для синтеза SC-цепей на основе ССII методом операционной имитации необходимо разработать SC-интегратор на основе ССII, мало чувствительный к паразитным емкостям.

Реализация устройств на основе новых схемотехнических блоков, в данном случае на основе ССII, требует разработки соответствующих методов символьного анализа таких устройств.

Важным этапом при разработке радиоэлектронных устройств, в том числе ЧИУ, является компьютерное моделирование. Схемы на основе активных элементов, например ОУ, ТУ, ССП, могут моделироваться либо на уровне макромоделей, либо на транзисторном уровне. Моделирование на уровне макромоделей занимает существенно меньшее машинное время, чем время моделирования на транзисторном уровне. В настоящее время в литературе не предложено полной макромоделей токового конвейера, учитывающей все свойства усилителя. Таким образом, важной задачей является разработка макромоделей токового конвейера, максимально полно учитывающей его поведение в составе дискретно-аналоговых цепей.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей диссертационной работы является разработка методики проектирования и реализация малопотребляющих микроэлектронных фильтров на переключаемых конденсаторах с расширенным частотным диапазоном на основе КМОП токовых конвейеров.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

- развитие символьных методов анализа аналоговых и дискретных цепей на основе токовых конвейеров;
- разработка SC-интегратора на основе токового конвейера с минимальной чувствительностью характеристик к паразитным емкостям элементов схемы;
- разработка КМОП-элементной базы для построения ЧИУ, включающей токовые конвейеры, повторители напряжения и электронные ключи;
- синтез фильтров нижних частот на основе интеграторов, малочувствительных к паразитным емкостям, с расширенным частотным диапазоном и малой потребляемой мощностью;
- разработка макромоделей токового конвейера с учетом его частотных, нелинейных и шумовых свойств;
- компьютерное моделирование ФНЧ, микроэлектронная реализация ФНЧ по 0.35-мкм КМОП-технологии и экспериментальное исследование реализованных интегральных схем.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы анализа и синтеза электрических цепей: метод ориентированного беспетлевого графа и метод узловых потенциалов, метод операционной имитации. Расчеты,

моделирование на ЭВМ и эксперимент проведены с помощью программ MathCAD, Matlab, Micro-CAP, Cadence, Eagle Layout Editor.

Положения, выносимые на защиту.

1. Для построения высокочастотных, малопотребляющих и занимающих малую площадь на кристалле микроэлектронных фильтров целесообразно реализовывать схемы на переключаемых конденсаторах с использованием токовых конвейеров в качестве активных элементов.
2. Для реализации фильтров на переключаемых конденсаторах на основе токовых конвейеров методом операционной имитации следует использовать токовые конвейеры на основе повторителя напряжения, выполненного на базе дифференциального каскада с обратной связью и подключенного к нему повторителя тока на комплементарной паре МОП-транзисторов.
3. Для реализации SC-интеграторов на основе токовых конвейеров, нечувствительных к паразитным емкостям, необходимо использовать следующую схему включения ССII: вывод Y подключается к «аналоговой земле», к выводу X подключается SC-имитатор резистивного импеданса, а к выводу Z подключается непереключаемый конденсатор. Для реализации демпфированного интегратора к описанной схеме добавляется заземленный SC-имитатор резистивного импеданса, подключенный к выводу Z .
4. Анализ схем, содержащих ССII, целесообразно проводить методом узловых потенциалов и методом ориентированного беспетлевого графа, что позволяет исследовать как схемы на основе идеализированных ССII, так и схемы на основе ССII с реальными параметрами, включая входные и выходные сопротивления, коэффициенты передачи по напряжению и току, полосу рабочих частот.
5. Полоса рабочих частот по уровню -3 дБ повторителя тока, входящего в состав ССII, должна превышать значение тактовой частоты не менее чем в 1.5 раза. При этом искажения характеристик фильтра, обусловленные ограниченностью полосы рабочих частот, не превышают заданный технологическими ограничениями разброс постоянных времени, равный 1 проценту.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны методики анализа цепей, содержащих токовые конвейеры. Предложены модели ССII для топологического и алгебраического анализа.

2. Проведен сопоставительный анализ характеристик различных реализаций токовых конвейеров. Разработана схема токового конвейера, который обладает набором характеристик, необходимым для реализации SC-схем.
3. Предложена схема электронного ключа, позволяющая компенсировать «эффект прямого прохождения» при максимальном динамическом диапазоне SC-схемы.
4. Разработана макро модель ССII, учитывающая частотные, нелинейные и шумовые свойства токовых конвейеров.
5. Разработан алгоритм реализации SC-фильтров на ССII методом операционной имитации.
6. Проведен эксперимент, подтвердивший возможность реализации малопотребляющих ФНЧ на переключаемых конденсаторах с расширенным диапазоном рабочих частот.

Практическая ценность. Предложена схема ССII, позволяющая реализовать SC-фильтры с расширенным диапазоном рабочих частот. Разработана макро модель токового конвейера, позволяющая в несколько раз сократить время, затрачиваемое на моделирование фильтра. Разработаны схемы нечувствительных к паразитным емкостям SC-интеграторов, которые являются базовыми блоками для реализации малопотребляющих фильтров, занимающих малую площадь на кристалле.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Микроэлектроника и информатика – 2001», восьмая Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 18-19 апреля 2001 г., Москва, МИЭТ; «XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ», межвузовская научная конференция, 26 ноября - 1 декабря 2001 г., Санкт-Петербург, СПбГТУ; «ICCSC'2002», 1st Int. conference on circuits and systems for communications, 26-28 июня 2002 г., Санкт-Петербург, СПбГПУ; «SPb-IEEE Con'04», 2004 IEEE RUSSIA (NORTHWEST) SECTION CONFERENCE, 9-10 июня 2004 г., Санкт-Петербург, СПбГЭТУ; «ICCSC'2004», 2nd Int. conference on circuits and systems for communications, 30 июня - 2 июля 2004 г., Москва, МТУСИ. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Основной текст диссертации содержит 177

машинописных страниц, 106 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 95 наименований.

Вклад автора в разработку проблемы. Основные научные положения, теоретические выводы, практические рекомендации, расчеты и моделирование в диссертации выполнены автором самостоятельно.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе проводится анализ публикаций, касающихся темы диссертационной работы. Рассматриваются общие вопросы реализации частотно-избирательных устройств, элементной базы микроэлектронных фильтров, методы синтеза ЧИУ, обоснованность применения тех или иных методов для синтеза различных типов фильтров. Сделан вывод о том, что для реализации ФНЧ на переключаемых конденсаторах на основе ССII целесообразно использовать метод операционной имитации. Определяющими факторами в данном случае стали низкая чувствительность реализуемого методом операционной имитации фильтра к разбросу значений элементов, а также возможность максимизации динамического диапазона фильтра с помощью процедуры выравнивания напряжений во внутренних узлах схемы.

Рассматриваются основные свойства и различные варианты реализаций ССII. Условное обозначение ССII приведено на рис.1.

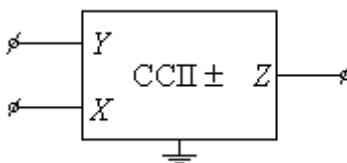


Рис.1. Токовый конвейер второго поколения.

Функционирование ССII описывается матричным уравнением (1):

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ v_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ K_U & 0 & 0 \\ 0 & \pm K_I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ I_X \\ v_Z \end{bmatrix} \quad (1),$$

где коэффициенты K_U и K_I в идеальном случае равны 1. Знак «+» или «-» перед коэффициентом K_I определяет тип токового конвейера – неинвертирующий и инвертирующий соответственно.

Приведена эквивалентная схема токового конвейера, из которой следует, что ССИ включает повторитель напряжения и повторитель тока. Предложено классифицировать различные схемные решения ССИ, реализованных по КМОП-технологии, по типу входящего в его состав повторителя напряжения: ССИ с повторителем напряжения со входом на истоке МОП-транзистора (тип SIVF), ССИ с повторителем напряжения со входом на затворе МОП-транзистора (тип GIVF) и ССИ с повторителем напряжения на основе дифференциального каскада (тип LTP).

Рассмотрены возможности применения ССИ для реализации звеньев фильтров в базисах токов и напряжений, конверторов импедансов, а также генераторов и усилителей.

Во второй главе рассмотрены вопросы символического анализа цепей, содержащих токовые конвейеры. Предложены методики алгебраического и топологического анализа как аналоговых, так и дискретно-аналоговых цепей, к классу которых относятся цепи на переключаемых конденсаторах. Алгебраический анализ проводится методом узловых потенциалов, а топологический – методом ориентированного беспетлевого графа. Разработана графологическая модель ССИ.

Построена обобщенная схема включения токового конвейера, анализ которой позволил получить схемы интеграторов в базисе напряжений. Интегратор является одним из базовых блоков при реализации фильтров методом операционной имитации. На основе полученных схем реализованы различные структуры SC-интеграторов на основе токовых конвейеров. Проведен анализ чувствительности характеристик SC-интеграторов к паразитным емкостям ключей, активных элементов и обкладок МОП-конденсаторов. В результате анализа выделены схемы интеграторов, имеющие минимальную чувствительность к паразитным емкостям, которые рекомендованы для использования в качестве базовых элементов для реализации фильтров на переключаемых конденсаторах (рис.2). Помимо представленных на рис.2 интеграторов без демпфирования, разработаны схема интегратора с демпфированием (рис.3) и схема, осуществляющая одновременно суммирование и интегрирование напряжений (рис.4).

Таким образом, получен набор структурных блоков, необходимый для реализации фильтра высокого порядка.

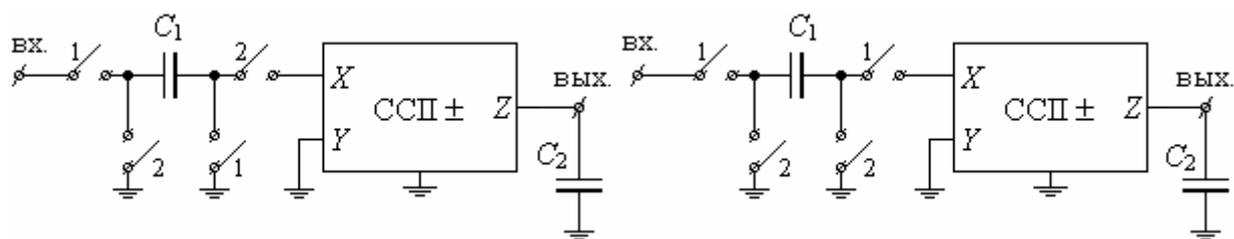


Рис.2. SC-интеграторы, нечувствительные к паразитным емкостям.

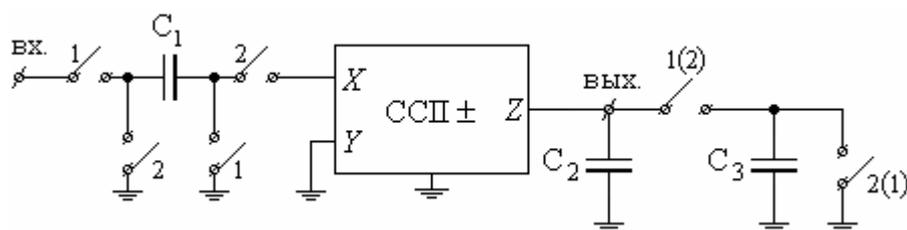


Рис.3. SC-интегратор с демпфированием.

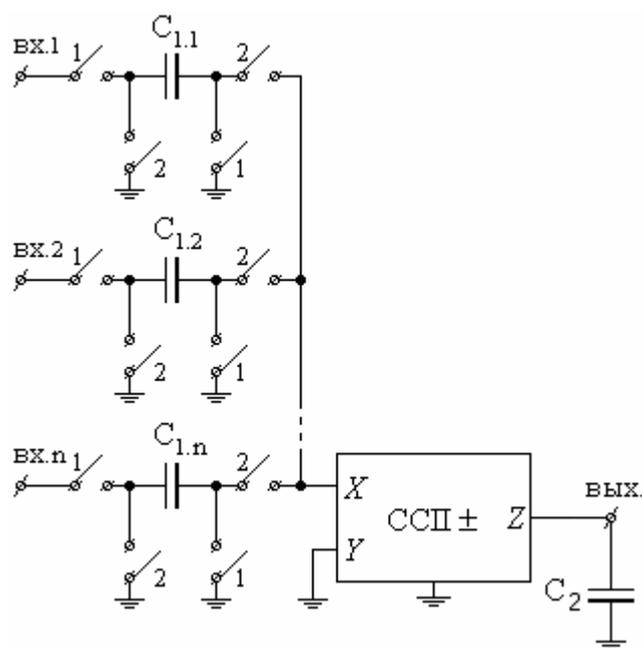


Рис.4. SC-схема, осуществляющая суммирование и интегрирование.

Разработана формализованная методика реализации ФНЧ высоких порядков методом операционной имитации. ФНЧ реализуется путем моделирования токов и напряжений в ветвях и узлах пассивного LC-прототипа с помощью активных цепей.

Основными структурными блоками реализуемого фильтра являются схемы, представленные на рис.2, 3, 4.

В третьей главе рассматриваются вопросы реализации микронэлектронной элементной базы разрабатываемого фильтра, которая включает повторители напряжения, токовые конвейеры и электронные ключи. Наличие среди перечисленных элементов повторителей напряжения обусловлено необходимостью устранения шунтирующего влияния входного сопротивления последующего каскада. Одним из основных требований к элементной базе является способность функционировать при стандартном для устройств, реализованных по 0.35-мкм КМОП-технологии, напряжении питания 2.5 В.

Сформулированы требования к полосе рабочих частот повторителей напряжения по уровню -3 дБ $f_{новт}$. Показано, что для того, чтобы ограниченная полоса рабочих частот повторителя напряжения не влияла на характеристики фильтра, между величиной $f_{новт}$ и периодом T_T тактовой частоты f_T должно выполняться следующее соотношение: $f_{новт} \geq \frac{10}{2\pi T_T} \approx 2f_T$. Разработана схема повторителя напряжения, которая представлена на рис.5.

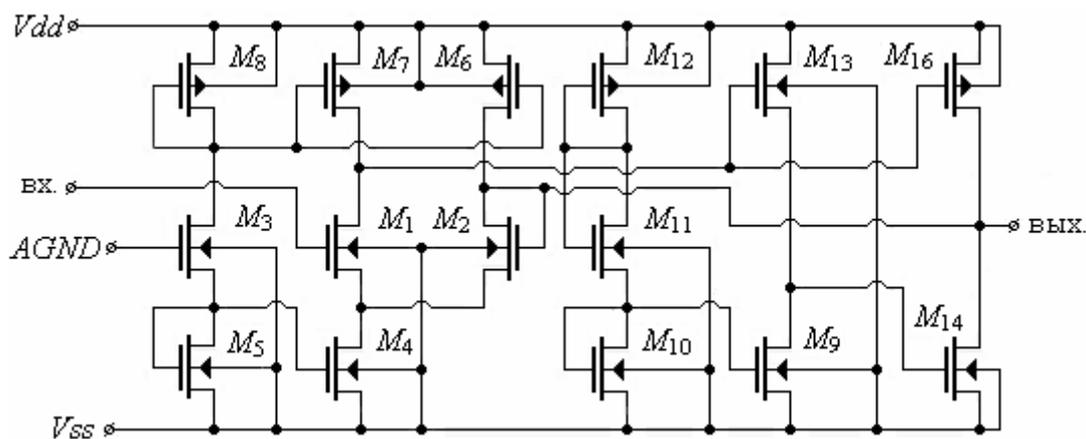


Рис.5. Повторитель напряжения.

Аналогично сформулированы требования к частотным параметрам повторителя тока, входящего в состав ССП. Полоса рабочих частот повторителя тока по уровню -3 дБ $f_{новтI}$ должна удовлетворять следующему соотношению: $f_{новтI} \geq \frac{4f_T}{\pi} \approx 1.5f_T$. Одним

из важнейших параметров ССИ при реализации фильтров по предложенной методике является выходное сопротивление на выводе Z . Например, как показали проведенные оценки, при реализации фильтра с полосой рабочих частот до 1 МГц сопротивление на выводе Z должно составлять не менее 2 МОм. При использовании в качестве повторителя тока токового зеркала, сопротивление на выводе Z в основном определяется свойствами токового зеркала. Анализ различных схем токовых зеркал показал, что использование токовых зеркал не позволяет добиться необходимой величины сопротивления на выводе Z при напряжении питания 2.5 В. Поэтому, было предложено использовать в качестве повторителя тока каскад на основе пары комплементарных МОП-транзисторов. Токковый конвейер в целом предложено реализовать на основе разработанного повторителя напряжения, подключив к нему вышеописанный повторитель тока. Тогда, схема токового конвейера выглядит, как показано на рис.6.

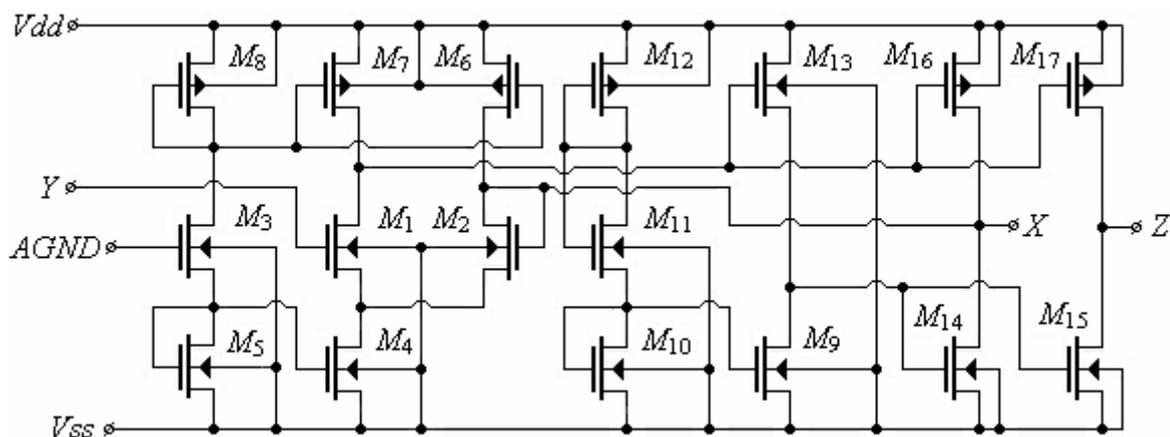


Рис.6. Токковый конвейер.

При реализации ключевого элемента необходимо учитывать такие факторы, как возможное искажение обрабатываемого сигнала при прохождении через ключ и, как следствие, ограничение динамического диапазона фильтра, а также эффект прохождения тактовых импульсов в цепь коммутации, обусловленный наличием паразитных емкостей на затворе МОП-транзистора, который является управляющим электродом. Поэтому, для достижения максимально возможного динамического диапазона предложено использовать ключи на основе комплементарной пары транзисторов, а для компенсации эффекта прямого прохождения тактовых импульсов –

емкости дополнительных транзисторов. Тогда схема принимает вид, показанный на рис.7.

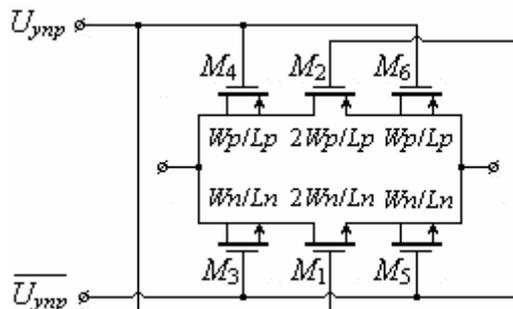


Рис.7. Ключевая схема.

Разработана макро модель токового конвейера второго поколения, учитывающая частотные, нелинейные и шумовые свойства (рис.8). Использование при компьютерном моделировании макро модели вместо принципиальной схемы позволяет существенно сократить временные затраты, которые особенно велики при моделировании дискретно-аналоговых схем.

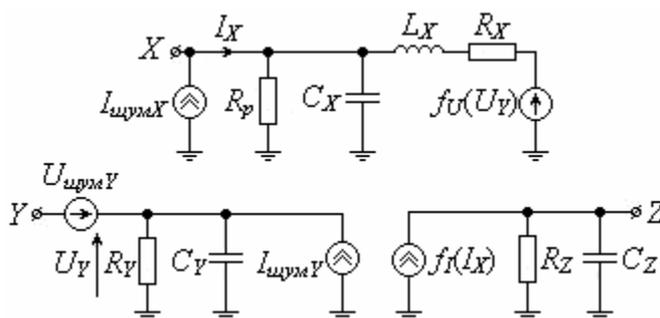


Рис.8. Макромодель ССII.

В четвертой главе приведены результаты компьютерного моделирования и эксперимента. Проведено тестирование разработанной в предыдущей главе макро модели, которое показало, что предложенная макро модель позволяет моделировать различные характеристики ССII с точностью не ниже единиц процентов.

По предложенной во второй главе методике синтезирован ФНЧ Чебышева 5-го порядка с частотой среза 1 МГц. Проведено моделирование частотных характеристик разработанного фильтра с использованием предложенной макро модели. Показано, что требования к частотным характеристикам повторителей напряжения и токовых

конвейеров сформулированы в третьей главе корректно, а разработанные во второй главе интеграторы действительно нечувствительны к паразитным емкостям.

Разработана топология тестовой микросхемы, включающей в себя фильтр 5-го порядка, токовый конвейер, автогенератор и схему, формирующую последовательности управляющих импульсов (рис.9).

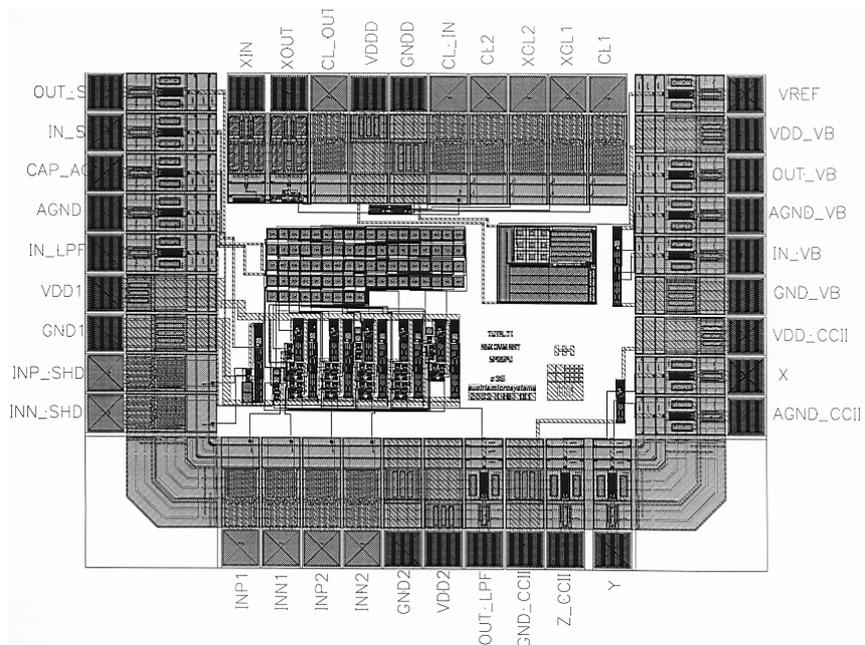


Рис.9. Топология тестовой микросхемы.

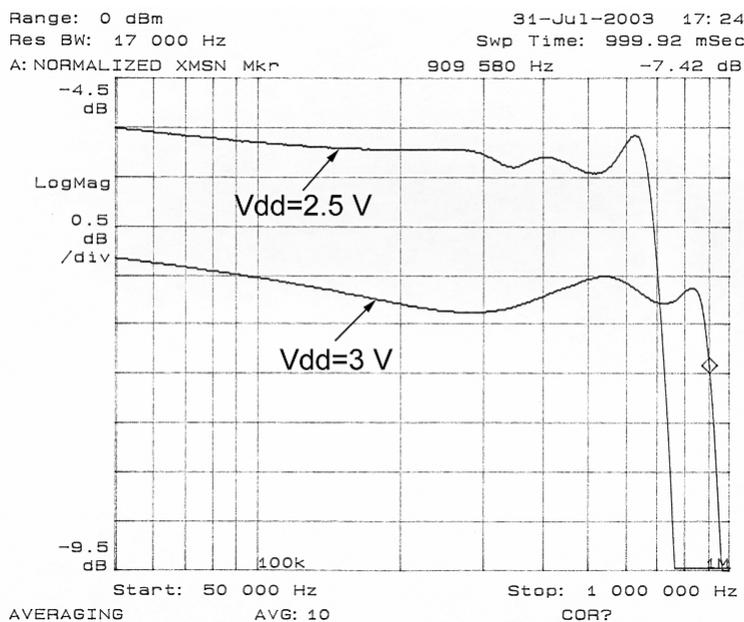


Рис.10. Результат измерений АЧХ фильтра при двух значениях напряжения питания.

Проведены измерения характеристик изготовленных по 0.35-мкм КМОП-технологии микросхем. Тактовая частота составляет 6.8 МГц. Измерения проводились при двух значениях напряжения питания V_{dd} : 2.5 В и 3 В. При этом измерения величин 2-й и 3-й гармоник выходного сигнала проводились при следующих условиях: для случая напряжения питания, равного 2.5 В, частота входного напряжения составляет 700 кГц, а амплитуда – 0.5 В; при напряжении питания 3 В входное напряжение представляет сигнал с частотой 900 кГц и амплитудой, равной 1 В. АЧХ фильтра приведены на рис.10, а основные результаты эксперимента сведены в табл.1.

Табл.1. Результаты измерений характеристик фильтра

Характеристика	$V_{dd}=2.5$ В	$V_{dd}=3$ В
Полоса пропускания	700 кГц	900 кГц
Неравномерность в полосе пропускания	1 дБ	1 дБ
Амплитуда 2-й гармоники по отношению к амплитуде 1-й гармоники	-24 дБ	-26 дБ
Амплитуда 3-й гармоники по отношению к амплитуде 1-й гармоники	-49 дБ	-54 дБ
Амплитуда гармоники тактовой частоты при заземленном входе фильтра	-48 дБ	-58 дБ
Потребляемый ток	1.3 мА	3.3 мА
Потребляемая мощность	3 мВт	9.9 мВт
Средняя спектральная плотность шума	1.27 мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	1.34 мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Среднеквадратичное шумовое напряжение, приведенное ко входу, в полосе частот 2 МГц	1.8 мВ	1.9 мВ

Экспериментальная АЧХ соответствует чебышевскому фильтру 5-го порядка. Частота среза фильтра при номинальном напряжении питания +2.5 В отличается от расчетного значения на 30 процентов, однако увеличение напряжения питания до +3 В приводит к расширению полосы пропускания до 900 кГц, что отличается от расчетного значения лишь на 10 процентов. Данное обстоятельство объясняется тем, что при компьютерном моделировании не учитывались такие факторы, как паразитные емкости

на контактных площадках микросхемы и внутри кристалла, а также неидеальность формы управляющих импульсов. Необходимо отметить, что разработанный фильтр занимает на кристалле площадь, равную 0.25 мм^2 и потребляет при напряжении питания 2.5 В мощность, равную 3 мВт, что составляет на один полюс передаточной функции соответственно 0.05 мм^2 и 0.6 мВт. Анализ публикаций, посвященных микроэлектронным фильтрам, показывает, что таким набором параметров не обладает ни один из предложенных в литературе фильтров. При этом динамический диапазон составляет порядка 50 дБ при коэффициенте нелинейных искажений по 3-й гармонике выходного напряжения, равном -49 дБ . По данной характеристике реализованный фильтр не уступает известным реализациям с диапазоном рабочих частот порядка единиц мегагерц. Таким образом, предложенная методика позволяет реализовать малопотребляющие высокочастотные фильтры без системы автоподстройки, занимающие малую площадь на кристалле.

В заключении представлены основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построены графологические и алгебраические модели токовых конвейеров. Развита методика символьного анализа аналоговых и дискретно-аналоговых цепей, содержащих токовые конвейеры, методом узловых потенциалов и методом ориентированного беспетлевого графа.
2. Разработаны блоки SC-интеграторов, в том числе с демпфированием, и схема, осуществляющая суммирование и интегрирование напряжений, малочувствительные к паразитным емкостям (рис.2–4).
3. Разработан алгоритм синтеза ФНЧ на переключаемых конденсаторах на основе токовых конвейеров методом операционной имитации.
4. Сформулированы требования к характеристикам повторителей напряжения и токовых конвейеров, входящих в состав фильтра. Разработаны схемы повторителя напряжения (рис.5) и ССИ (рис.6), удовлетворяющие сформулированным требованиям: выходное сопротивление на выводе Z составляет порядка 2.5 МОм,

диапазон рабочих частот повторителя тока в составе токового конвейера по уровню -3 дБ равен 15 МГц.

5. Разработана схема электронного ключа, позволяющего добиться максимально возможного динамического диапазона фильтра и компенсирующего паразитный эффект прохождения тактовых импульсов в цепь коммутации (рис.7).
6. Разработана макро модель ССП, позволяющая учесть при моделировании частотные, нелинейные и шумовые характеристики (рис.8). Моделирование АЧХ фильтра с использованием разработанной модели показало, что различие в результатах по сравнению с моделированием на транзисторном уровне составляет не более 0.5 дБ. При этом время, затрачиваемое на моделирование АЧХ, по сравнению с моделированием на транзисторном уровне уменьшено приблизительно в 10 раз.
7. По предложенной методике разработан и реализован по 0.35-мкм КМОП-технологии в виде заказной микросхемы ФНЧ Чебышева 5-го порядка с частотой среза 1 МГц. Проведены измерения экспериментальных характеристик ФНЧ, которые показали, что использование ССП в качестве активного элемента позволяет расширить частотный диапазон SC-фильтров от 150-200 кГц до единиц мегагерц. Динамический диапазон составляет порядка 50 дБ при уровне 3-й гармоники, равном -49 дБ относительно амплитуды 1-й гармоники, что является типичным значением для известных реализаций КМОП-фильтров, работающих в данном частотном диапазоне. При этом потребляемая мощность фильтра составила около 3 мВт, занимаемая на кристалле площадь – 0.25 мм². По данным характеристикам разработанный фильтр в 2–2.5 раза превосходит известные реализации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Тутышкин А.А.* Анализ схем на основе токовых конвейеров методом ориентированного графа // Микроэлектроника и информатика – 2001. Восьмая Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. – М.: МИЭТ. – 2001. – С. 109.
2. *Korotkov A.S., Tutyshkin A.A.* Topological analysis of continuous- and discrete time current-conveyor based circuits // Proc. Int. Symposium on signals, circuits and systems (SCS'01). – Iasi, Romania. – 2001. – P. 533–536.

3. *Коротков А.С., Тутышкин А.А.* Токовые конвейеры: развитие, схемотехника, применение // Зарубежная Радиоэлектроника. – 2002. – № 11. – С. 64–78.
4. *Тутышкин А.А., Коротков А.С.* Схемотехника КМОП-усилителей тока – токовых конвейеров // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.VIII: Материалы межвузовской научной конференции. – СПб.: Изд-во СПбГТУ. – 2002. – С. 39–41.
5. *Тутышкин А.А., Коротков А.С.* Анализ цепей с токовыми конвейерами при помощи графов // Радиоэлектроника (Изв. вузов). – 2003. – № 8. – С. 58–64.
6. *Tutyshkin A.A., Korotkov A.S.* Current conveyor based switched-capacitor integrator with reduced parasitic sensitivity. // Proc. 1st IEEE Int. Conference on circuits and systems for communications (ICCSC'02). – St.Petersburg, Russia. – 2002. – P. 78–81.
7. *Korotkov A.S., Tutyshkin A.A.* Macromodel of CMOS CCI with nonlinear and noise parameters // Proc. 2nd IEEE Int. Conference on circuits and systems for communications (ICCSC'04). – Moscow, Russia. – 2004. – CD version. – File № 41.
8. *Korotkov A.S., Morozov D.V., Tutyshkin A.A., Hauer H., Unbehauen R.* Design of a CMOS high frequency current conveyor based switched-capacitor filter with low power consumption // Proc. Midwest Symposium on circuits and systems (MWSCAS'03). – Cairo, Egypt. – Vol. I. – 2003. – P. 39–42.