

Импортозамещение АЦП и ЦАП: ограничения и возможности

Рассмотрены ограничения и возможности импортозамещения аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователей. Показано, что импортозамещение типовой номенклатуры современных преобразователей возможно только при наличии сертифицированных технологий массового производства и высококачественных дизайн-китов с точным описанием влияния технологических разбросов. Отмечено, что существующие технологии с «типовой» сертификацией, не учитывающей влияние технологических разбросов, обеспечивают на приемлемом уровне разработку и производство основной массы цифровых микросхем и только отдельных типов АЦП и ЦАП с невысокими техническими характеристиками. Для уменьшения импортозависимости по АЦП и ЦАП с современными техническими характеристиками в условиях существующего технологического базиса предложено использовать бесконденсаторные архитектуры с малой долей прецизионных аналоговых устройств, калибровка которых может осуществляться в автоматическом режиме при незначительных аппаратных затратах. Приведены примеры конкретных разработок многоуровневых высокоскоростных АЦП и ЦАП и техника их калибровки.

Владимир КОНОНОВ,
к. т. н.
cassandra1983@mail.ru
Дмитрий БОДНАРЬ,
к. т. н.
bodnar@syntezmicro.ru

Основные причины существующей пока зависимости от иностранного производства во многом одинаковы как для цифровых микросхем, так и для АЦП и ЦАП. С точки зрения сложности проектирования и влияния технологических разбросов на параметры АЦП и ЦАП являются одними из самых сложных изделий в микроэлектронике. Как правило, именно АЦП и ЦАП составляют значительную долю номенклатуры изделий микроэлектроники, подпадающих в США под экспортные ограничения. Они же и преобладают в списках контрабандных продуктов, которые пытаются незаконно в обход экспортных лицензий вывезти из США в другие страны.

В нашей стране выпуск АЦП и ЦАП ограничен возможностями отечественного кристалльного производства, которое отстает от передового зарубежного уровня по используемому оборудованию, технологиям и качеству сертификации этих технологий. К счастью, закупленные еще в досанкционные времена технологические линейки позволили ведущим отечественным предприятиям, таким как АО «Микрон» и АО «Ангстрем», освоить технологии с проектными нормами 180, 90 и 65 нм и тем самым снизить остроту проблемы импортозамещения. Следующий шаг — плановый запуск крупных технологических фабрик на 45 и 28 нм — позволит на качественном уровне в значительной степени нивелировать данную проблему, что предполагает достижение паритета по со-

поставимым техническим характеристикам твердотельной электронной компонентной базы (ЭКБ). Однако до сих пор нерешенными остаются вопросы создания соответствующих дизайн-китов, методов верификации и аттестации процессов и продукции.

Остается открытым и вопрос по обеспечению баланса по номенклатуре и объемам выпуска такой ЭКБ. Для его решения обсуждается возможность создания и применения мини-фабрик при крупных производителях радиоэлектронной аппаратуры [1, 2], что

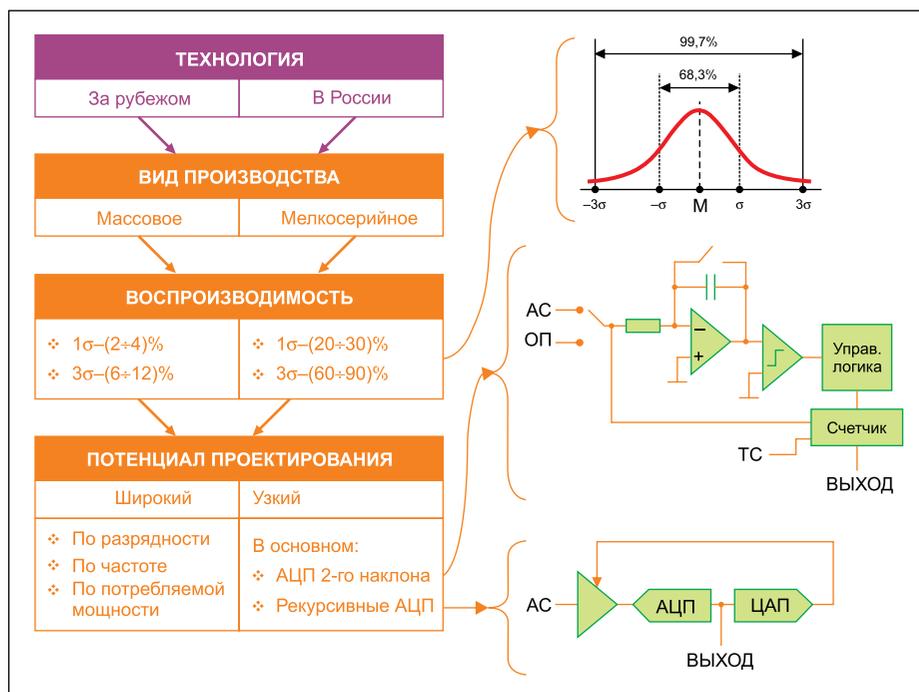


Рис. 1. Современные технологии и их возможности:

M — характеристический параметр; АС и ТС — аналоговый и тактовый сигналы; ОП — опорное напряжение

потребуется значительных государственных вложений, но по существующему мнению позволит расширить многообразие выпускаемых микросхем. Однако такой подход неприемлем для разработчиков АЦП и ЦАП, поскольку мини-фабрики предполагают узкую специализацию изготавливаемой продукции и выпуск изделий мелкими сериями, а подобный подход обычно не отличается высокой воспроизводимостью. Как показывает мировой опыт, только при массовом производстве достигается наиболее высокая воспроизводимость и обеспечивается необходимая точность сертификации технологий, что позволяет создать высококачественные дизайн-киты, а без них проектирование современных АЦП и ЦАП не представляется возможным. Пока же отечественные предприятия в основном ориентируются на изготовление цифровых микросхем, для разработки которых в большинстве случаев достаточно «типовой» сертификации, не учитывающей влияние технологических разбросов.

Сопоставимая оценка зарубежных и отечественных технологий приводит к осознанию того факта, что в настоящее время российские технологии допускают проектирование только двух типов многоразрядных АЦП — с архитектурой двойного наклона и рекурсивной архитектурой (рис. 1). Объясняется это тем, что каждая из указанных архитектур предусматривает лишь один операционный усилитель (ОУ), в котором для компенсации технологических разбросов можно использовать средства калибровки с приемлемыми для данного случая аппаратными затратами и увеличением площади кристалла. Разумеется, подобный подход не пригоден при создании конвейерных АЦП, составляющих львиную долю рынка современных АЦП, поскольку в каждом разряде таких АЦП используется по одному ОУ.

В качестве альтернативы, отвечающей возможностям отечественной технологии, можно применять бесконденсаторные архитектуры АЦП, которые примерно на 90% реализу-

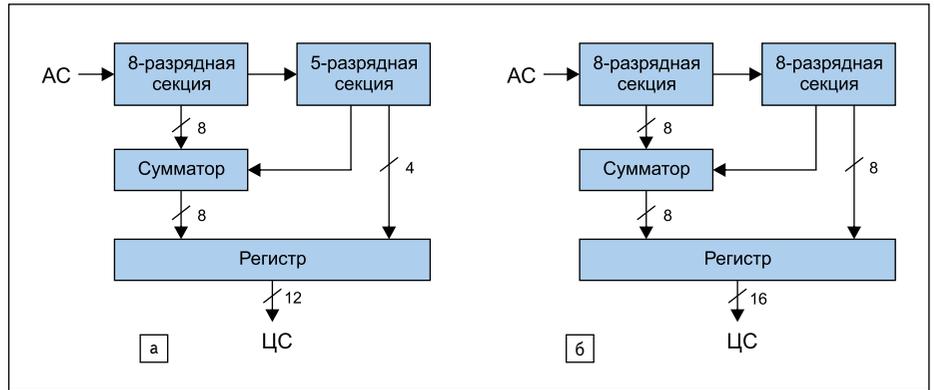


Рис. 2. Бесконденсаторные АЦП с автоматической калибровкой (ЦС — цифровой сигнал). Архитектура 1-ГГц АЦП: а) 12-разрядного; б) 16-разрядного

ются в цифровом базисе [3]. На основе таких архитектур в настоящее время в России разрабатываются 12–16-разрядные 1-ГГц АЦП с автоматической калибровкой точностных характеристик (рис. 2), не требующей значительных аппаратных затрат.

Основные характеристики:

- разрядность: 12–16 бит;
- частота преобразования: 1 ГГц;
- напряжение питания: 1,8 В ±5%;
- выходные интерфейсы:
 - 4 порта КМОП,
 - 2 порта LVDS.

В случае ЦАП проблема сводится к необходимости поразрядной калибровки, что особенно актуально при создании многоразрядных высокоскоростных преобразователей. Одним из таких подходов, реализованных при проектировании отечественного 14-разрядного 1-ГГц ЦАП с автоматической калибровкой, является метод частотного взвешивания «весовых» токов, описанный в [4–6] (рис. 3).

Основные характеристики:

- разрядность: 14–16 бит;
- частота преобразования: 500–1000 МГц;
- напряжение питания:
 - 1,8 В ±5%,
 - 3,3 В ±5%.

Необходимо отметить, что столь пристальное внимание к автоматической калибровке в России уделяется не только из-за технологических ограничений кристалльного производства. В настоящее время это стало общемировой тенденцией, в сферу которой вовлечены даже столь крупные зарубежные производители АЦП и ЦАП, как Analog Devices, Texas Instruments, и другие. Основной причиной является необходимость калибровки точностных характеристик при компенсации эффектов старения и деградации полупроводниковой структуры в режиме удаленного доступа. Однако даже в обычных сугубо «земных» приложениях автоматической калибровке стали отдавать предпочтение из-за существующего мнения об отрицательном влиянии на ресурс микросхем применяемой ранее производственной калибровки с помощью плавких перемычек. Сегодня принято считать, что в эпицентре пережигания такой перемычки возникают механические напряжения, провоцирующие образование микротрещин, способных в течение ограниченного времени «дойти» до соседних активных областей и в итоге привести к ухудшению точностных характеристик и даже к отказу микросхемы (рис. 4).

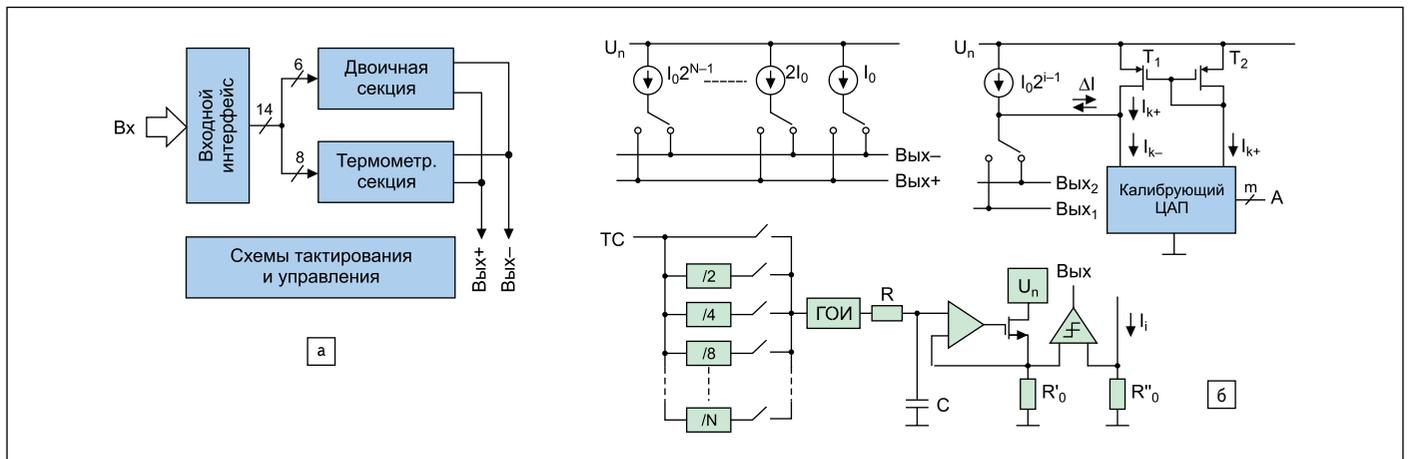


Рис. 3. 14-разрядный 1-ГГц ЦАП: а) архитектура; б) техника автоматической калибровки (U_n — напряжение питания; $I_i = I_0 2^{i-1}$ — «весовой» ток; I_0 — «вес» младшего разряда)

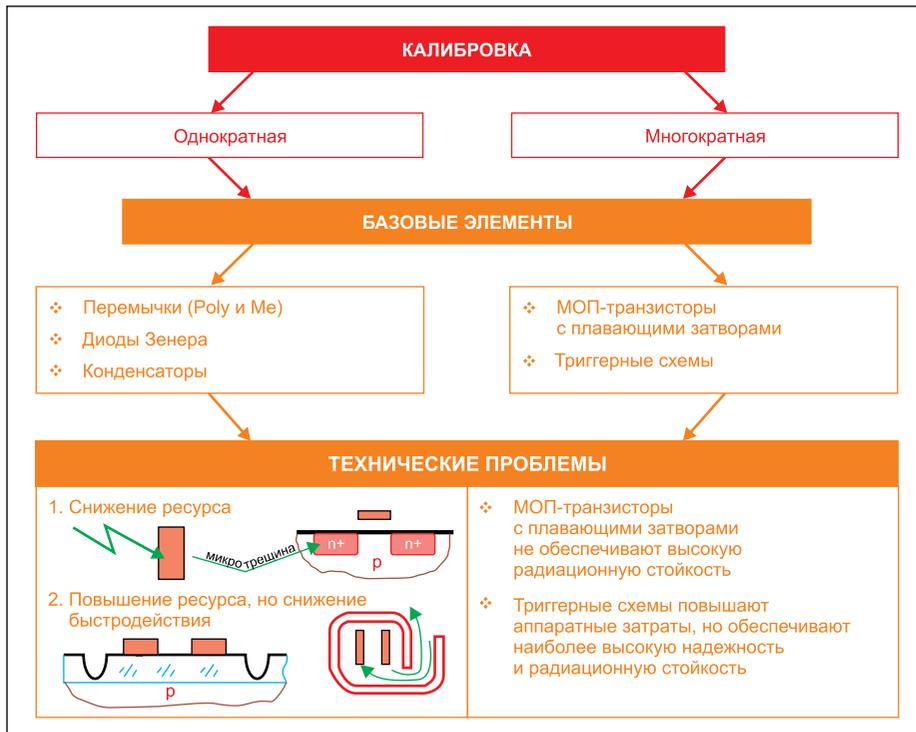


Рис. 4. Методы калибровки и их влияние на ресурс микросхем

Для уменьшения влияния микротрещин предпринимаются различные попытки ограничить распространение микротрещин и создать определенные препятствия на пути их вероятного распространения. В левой нижней части рис. 4, например, показан вариант размещения плавких перемычек в охранном кольце, имеющем форму «улитка», что позволяет ограничить распространение микротрещин за пределы охранного кольца и таким образом предотвратить возможность провоцирования отказов. Однако эффективное использование подобных колец предполагает травление диэлектрика до поверхности подложки, а это вступает в противоречие с требо-

ваниями существующих ГОСТов, регламентирующих технологию сборки микросхем.

Выводы

1. Импортозамещение современных АЦП и ЦАП с наиболее распространенными архитектурами возможно при наличии сертифицированных технологий массового производства и высококачественных дизайн-китов с точным описанием влияния технологических разбросов.
2. Существующие в России технологии мелкосерийного производства с «типовой» сертификацией, не учитывающей влияние

технологических разбросов, пригодны лишь для разработки и изготовления цифровых микросхем и некоторых типов АЦП с невысокими техническими характеристиками (АЦП двойного наклона, рекурсивные АЦП и др.).

3. Для уменьшения импортозависимости по АЦП и ЦАП с современными техническими характеристиками в условиях существующего технологического базиса целесообразно использовать бесконденсаторные архитектуры с малой долей прецизионных аналоговых устройств (операционных усилителей, источников опорных напряжений и т. д.), калибровка которых может осуществляться в автоматическом режиме при незначительных аппаратных затратах.

Литература

1. Боднар Д. М. Новый формат компактных кремниевых фабрик — решение для микроэлектроники России // Электронные компоненты. № 3. 2015.
2. Колмогоров Г., Шиллер В., Шпак В. Импорто-независимость электроники России: необходима и возможна // Компоненты и технологии. 2017. № 4.
3. Кононов В. С. Архитектуры бесконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП для космического применения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 1.
4. Кононов В. С. Способ автоматической калибровки «весовых» токов в многоразрядных КМОП-ЦАП // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2.
5. Кононов В. С. Автоматическая калибровка многоразрядных КМОП-КНИ-ЦАП на источниках тока // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2.
6. Кононов В. С. Анализ частотного метода автоматической калибровки многоразрядных КМОП-ЦАП на токовых ключах // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2.