

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА БЕЗКОНДЕНСАТОРНЫХ КМОП-АЦП

В. С. Кононов

ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем»

Поступила в редакцию 27.05.2016 г.

**Аннотация.** Отмечены ограничения и недостатки однократной калибровки на основе лазера и плавких перемычек. Рассмотрена техника автоматической калибровки основных аналоговых блоков. Проведена оценка аппаратных затрат на организацию калибровки.

**Ключевые слова:** АЦП, калибровка, техника, затраты.

**Annotation.** Limitation and disadvantages of one-time calibration, based on laser trimming, are shown. Auto-calibration technique for main analogue blocks is considered. Hardware requirements for organization of calibration are estimated.

**Keywords:** ADC, calibration, technique, resources.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных структурных компонентов современных информационных систем являются средства сбора данных, которые строятся на основе высокопроизводительных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Во многих приложениях, в том числе специальных, такие АЦП должны непрерывно функционировать без заметного ухудшения точностных характеристик. Иначе говоря, все процессы, связанные, например, с эффектами старения и влияния одиночных частиц космического происхождения, должны нивелироваться в процессе работы, что может достигаться с помощью автоматической калибровки. Следует отметить, что до сих пор не существует ни одного многоразрядного ( $> 10$  бит) АЦП, в котором не была предусмотрена в той или иной степени калибровка точностных характеристик.

В прошлые годы процедура калибровки основывалась преимущественно на использовании лазера или плавких перемычек. В методологическом смысле такая калибровка является однократной и проводится она, как правило, в условиях производства, реже на предприятиях, осуществляющих разработку

аппаратуры. Естественно, что такой подход не может до конца решить проблемы, связанные с влиянием различных эксплуатационных факторов.

Существует мнение, что температурный «удар» при воздействии лазера или при перегреве перемычек может приводить к остаточным механическим напряжениям на локальных участках кристалла и, как следствие, к ограничению ресурса работоспособности АЦП. По этой причине современные АЦП разрабатывают ориентируясь в основном на использование автоматической калибровки. Такой подход в условиях России позволяет пересмотреть культуру проектирования АЦП, которая в классическом понимании требует наличия высокостабильного массового производства. В результате можно использовать мелкосерийное производство кристаллов, которое обычно не отличается высокой воспроизводимостью (характерно для отечественного производства) и с помощью автоматической калибровки компенсировать технологические отклонения параметров АЦП. При соответствующей аппаратной организации автоматическую калибровку можно распространить на компенсацию эффектов старения и последствий от воздействия одиночных высокоэнергетических частиц при эксплуатации АЦП в жестких условиях (например, в космосе).

Целью данной статьи является оценка техники автоматической калибровки аналоговых блоков безконденсаторных КМОП-АЦП и аппаратных затрат на ее организацию.

Как следует из [1, 2], в таких АЦП основную часть площади кристалла (~ 80 %) занимают цифровые блоки и только около 20 % приходится на аналоговые устройства, которые являются наиболее уязвимыми при воздействии рассмотренных выше факторов. К таким устройствам относятся предварительные дифференциальные усилители и защелки во входных компараторах, операционные усилители и схемы фазовой автоподстройки частоты внутренних синхроимпульсов.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Во входных каскадах АЦП наиболее часто применяют предварительные дифференциальные усилители (ПДУ), выполненные по, так называемой, разностной схеме [3] (рис. 1, а). Эта схема хорошо подавляет внешние помехи и внутренние шумы.

Однако при большом числе входных компараторов (в безконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП их количество может составлять 24 шт) возникают трудности при создании опорных цепочек с одинаковым шагом изменения опорных напряжений вдоль таких цепочек. Для преодоления этих трудностей можно воспользоваться, например, сдвоенными резисторами из развернутых параллельных рядов (рис. 1, б), которые, как показала практика, обеспечивают приемлемую точность поддержания шага опорных напряжений. Данное обстоятельство позволяет исключить необходимость индивидуальной калибровки резисторов в опорной цепочке. В результате при калибровке ПДУ достаточно проводить только компенсацию смещения, которое, как известно, возникает из-за технологических ограничений при обеспечении идентичности дифференциальных пар МОП-транзисторов.

Несмотря на существование множества проверенных способов компенсации смещения [4, 5], в данной статье предлагается использовать токовые зеркала на выходах ПДУ (рис. 2). Применение таких зеркал сводится

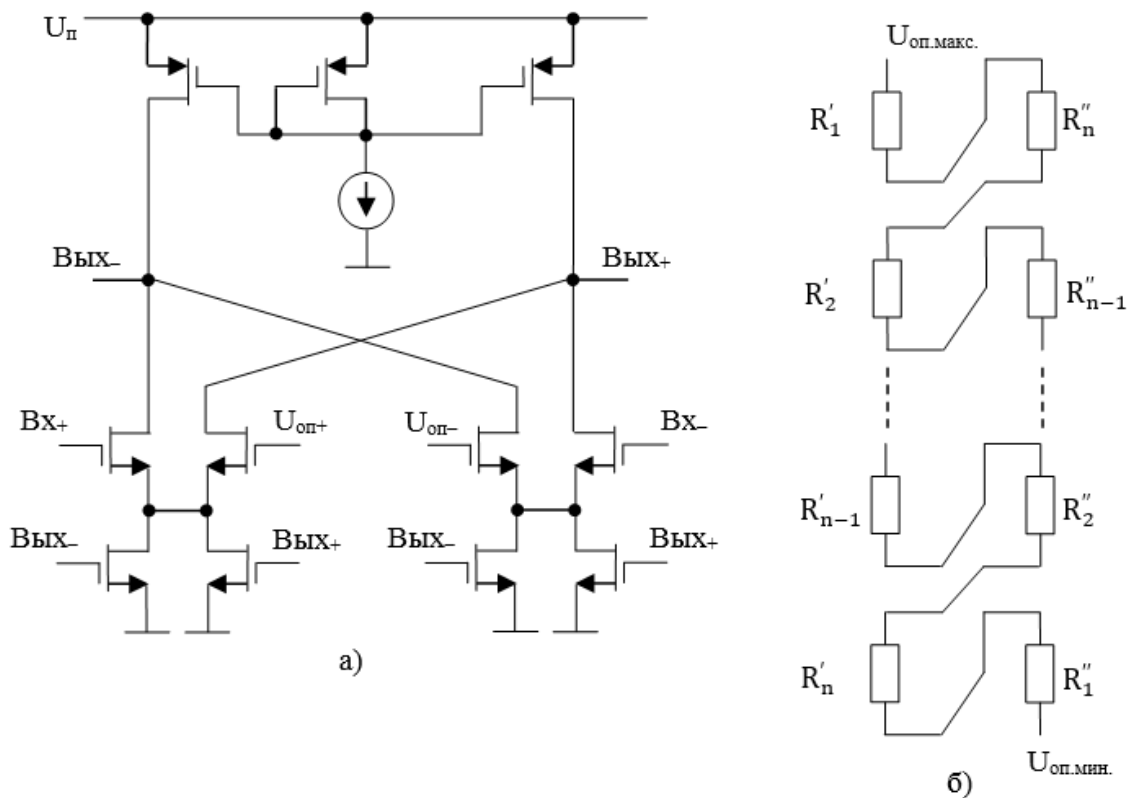


Рис. 1. Блок-схема разностного усилителя (а) и схема выравнивания шага опорной цепочки (б):  $U_{п}$  – напряжение питания;  $U_{оп+}$ ,  $U_{оп-}$  – опорные напряжения;  $R_i' \sim R_i''$

к добавлению двух МОП-транзисторов с заземленными истоками непосредственно в ПДУ, что по сравнению с известными подходами позволяет минимизировать емкостную нагрузку на выходах ПДУ благодаря отделению цепей калибровки от этих выходов.

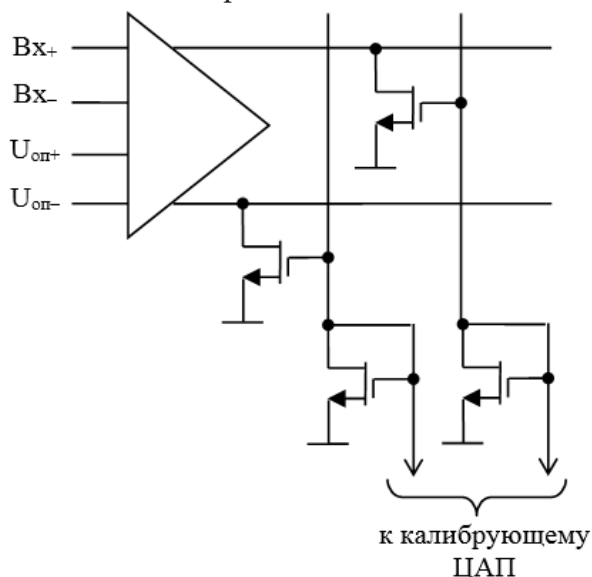


Рис. 2. Блок-схема ПДУ, иллюстрирующая технику калибровки с помощью токовых зеркал: ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

При этом правильность калибровки можно оценить по факту переключения компаратора (на рис. 2 не показан). В результате аппаратные затраты на калибровку ПДУ можно свести к использованию 16-разрядных токовых ЦАП по аналогии с [5] с той лишь разницей, что эти ЦАП включаются во входные цепи токовых зеркал и выносятся на периферию кристалла.

### ЗАЩЕЛКИ

Во входных компараторах безконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП нашла применение модифицированная защелка (рис. 3), из которой по сравнению с известной защелкой [6] исключены два проходных NМОП-транзистора.

Опыт использования этой защелки, как и любых других защелок, показал, что на практике возможности калибровки защелок сильно ограничены, несмотря на кажущуюся целесообразность такой процедуры. Ограни-

чения обусловлены особенностью работы защелок, которая независимо от типа защелки определяется способностью к переключению при размахах входных сигналов, составляющих всего несколько милливольт. При таких размахах прохождение на кристалле дополнительных шин над защелкой или рядом с ней может привести к появлению соизмеримых выбросов напряжения из-за паразитных емкостных связей и, в итоге, вызвать сбой в работе защелки. По этим причинам защелки стараются проектировать таким образом, чтобы исключить прохождение над ними «посторонних» шин, что напрашивается при организации калибровки, а борьбу со смещением в защелках обычно сводят к увеличению ширины и длины каналов составляющих МОП-транзисторов.

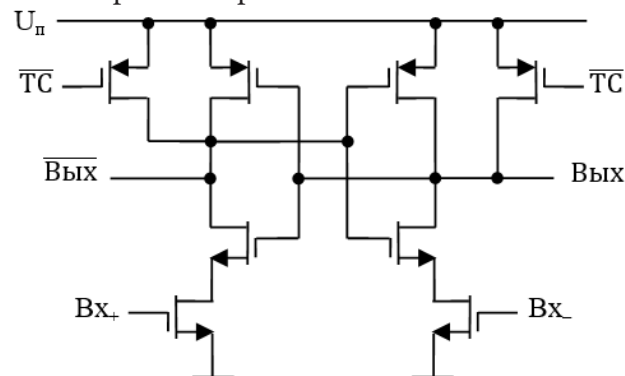


Рис. 3. Модифицированная защелка:  $\overline{TC}$  – инверсный тактовый сигнал

### ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

При калибровке операционных усилителей (ОУ) проводят компенсацию смещения и корректировку коэффициента усиления. Техника компенсации смещения и аппаратные затраты на ее организацию практически такие же как в ПДУ.

Корректировку коэффициента усиления ОУ в безконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП целесообразно проводить путем регулировки коэффициента обратной связи с помощью магазина NМОП-транзисторов с различной длиной канала (рис. 4).

Каждый NМОП-транзистор на рис. 4 вносит дискретную добавку к сопротивлению резистора  $R_1$ , влияя, таким образом, на коэф-

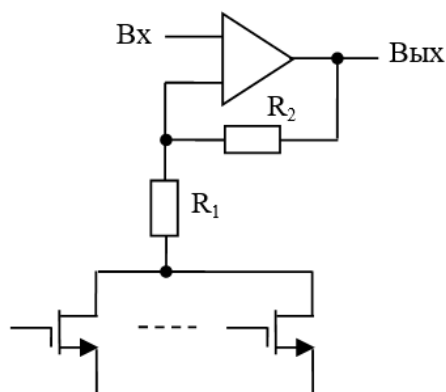


Рис. 4. Блок-схема ОУ, иллюстрирующая технику регулировки коэффициента усиления

коэффициент усиления ОУ. При необходимости можно использовать токовые зеркала для плавного изменения сопротивлений каналов этих транзисторов.

Правильность калибровки ОУ можно оценить с помощью специального высокочувствительного компаратора, который при калибровке смещения фиксирует переход через «ноль» на выходах компаратора. При калибровке коэффициента усиления этот компаратор будет фиксировать нахождение выходного напряжения ОУ между двумя опорными уровнями, соответствующими допустимому разбросу значений коэффициента усиления. Контроль этого условия не требует дополнительных аппаратных затрат, так как на входе следующей после ОУ секции АЦП находится блок компараторов, предназначенных для компарирования подобных уровней.

### СХЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Калибровка схем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) проводится в случае смещения характеристики  $f_{ГУН} = f(U_{ГУН})$  под воздействием старения и одиночных частиц космического происхождения. Здесь  $f_{ГУН}$  – частота генератора управляемого напряжением (ГУН), а  $U_{ГУН}$  – управляющее напряжение. Теоретически зависимость  $f_{ГУН} = f(U_{ГУН})$  предполагается линейной. Однако на практике она получается не совсем такой.

В итоге задача калибровки ГУН сводится к подбору и согласованию центральной частоты

ты  $f_{ГУН0}$  со средним напряжением  $U_{ГУН0}$  на требуемом участке фазовой автоподстройки частоты  $\Delta f_{ГУН}$  с приемлемой линейностью [7]. При этом собственно калибровку характеристики  $f_{ГУН} = f(U_{ГУН})$  можно выполнить с помощью магазина резисторов  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , коммутируемых ключами на НМОП-транзисторах (рис. 5).

Для оценки правильности калибровки необходимо сравнить опорную частоту с  $f_{ГУН}$  путем подачи соответствующих сигналов на схему «исключающее ИЛИ». В качестве опорной частоты можно использовать частоту входного тактового сигнала, которая обычно совпадает с  $f_{ГУН}$ .

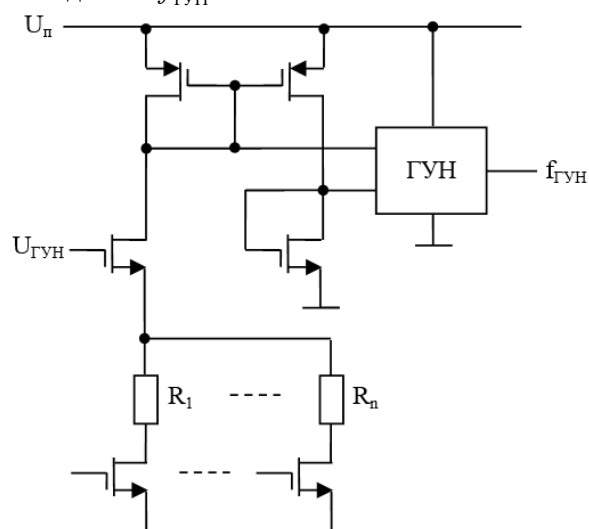


Рис. 5. Блок-схема ГУН, иллюстрирующая технику калибровки характеристики  $f_{ГУН} = f(U_{ГУН})$

Завершая проведенный анализ, отметим, что процедура калибровки во всех рассмотренных случаях не отличается особой сложностью и может быть реализована доступными схмотехническими средствами.

### ВЫВОДЫ

1. Техника производственной калибровки, основанная на использовании лазера и плавких перемычек, приводит к ухудшению ресурса работоспособности и в целом не обеспечивает иммунитет к эксплуатационным факторам.

2. Известная техника автоматической калибровки, нашедшая применение при соз-

дании, так называемых, конденсаторных КМОП-АЦП, не всегда может быть использована в безконденсаторных АЦП из-за специфики архитектуры основных блоков, а те немногие решения для блоков общего применения не отличаются приемлемой эффективностью.

3. Предложенная техника автоматической калибровки безконденсаторных КМОП-АЦП, основанная на анализе специфики работы основных блоков с учетом воздействия различных производственных и эксплуатационных факторов, достаточно эффективна и может быть реализована доступными схемотехническими средствами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рембеза С. И. Высокоскоростной безконденсаторный КМОП-АЦП с интерполирующими защелками и реверсируемым тактированием / С. И. Рембеза, В. С. Кононов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №2. – С. 23–26.

2. Рембеза С. И. 12-разрядный безконденсаторный КМОП-АЦП с КНИ-структурой /

С. И. Рембеза, В. С. Кононов // Моделирование систем и процессов. – Воронеж, 2013. – №4. – С. 53–55.

3. Rudy van de Plassche. CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters / Rudy van de Plassche. – Kluwer academic publishers, 2003. – 588 p.

4. Рембеза С. И. Балансировка дифференциальных каскадов в параллельных КМОП-АЦП со складывающейся архитектурой на КНИ-подложках / С. И. Рембеза, В. С. Кононов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – вып. 1, № 1 (63). – С. 28–32.

5. Park S. A 4 GS/s 4b Flash ADC in 0,18  $\mu\text{m}$  CMOS / S. Park, Y. Palaskas, M.P. Flynn // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2006. – S. 31. – P. 9–11.

6. Yao L. Low-power low-voltage sigma-delta modulators in nanometer CMOS / L. Yao, M. Steyaert, W. Sansen. – Springer, 2006 – 158 p.

7. Baker R. J. CMOS: Circuit Design, Layout and Simulation / R. J. Baker – IEEE Press, 2005. – 1039 p.

**Кононов В. С.** – канд. техн. наук, АО «СКТБ ЭС».

Тел.: (4732) 23-46-79

E-mail: casandra1983@mail.ru

**Kononov V. S.** – candidate of technical sciences, JSC «SKTB ES».

Tel.: (4732) 23-46-79

E-mail: casandra1983@mail.ru