

АНАЛИЗ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ МНОГОРАЗРЯДНЫХ КМОП-ЦАП НА ТОКОВЫХ КЛЮЧАХ

Кононов В.С., к.т.н., ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», e-mail: casandra1983@mail.ru.

ANALYSIS OF FREQUENCY AUTO-CALIBRATION TECHNIQUE FOR MULTIBIT CMOS-SOI-DAC WITH CURRENT SOURCES

Kononov V.S.

Main factors, which influence precision of calibration, are considered. Techniques for minimizing influence of this factors during calibration process are described.

Key words: CMOS, DAC, duty cycle, leakage.

Ключевые слова: КМОП, ЦАП, скважность, утечка.

Введение

В статье [1] сообщалось о методе калибровки многозарядных КМОП-ЦАП на токовых ключах (рис. 1), основанном на использовании тактовой частоты для получения набора источников опорных напряжений.

Было показано, что при делении тактовой частоты последовательно на 2, 4, 8, ..., N (N – разрядность ЦАП) и использовании генератора одиночных импульсов (ГОИ), можно получить набор сигналов с различной скважностью, а затем с помощью зарядовой помпы на RC-элементах преобразовать эти сигналы в соответствующий набор источников опорных напряжений (рис. 2).

Так как напряжение на конденсаторе C зависит только от скважности сигнала на входе RC-цепи и не зависит от частоты [2], то и напряжение на R₁ (опорное напряжение) не будет зависеть от частоты. Этот факт делает рассмотренный метод чрезвычайно привлекательным при организации автоматической калибровки КМОП-ЦАП на токовых ключах.

Целью данной статьи является обоснование применимости частотного метода при автоматической калибровке многозарядных КМОП-ЦАП на токовых ключах.

Рассматривая рис. 2, можно выделить 3 основных фактора, оказывающих определяющее влияние на точность калибровки:

- скважность тактового сигнала;
- утечка тока в конденсаторе C и его нелинейность;
- нелинейность операционного усилителя.

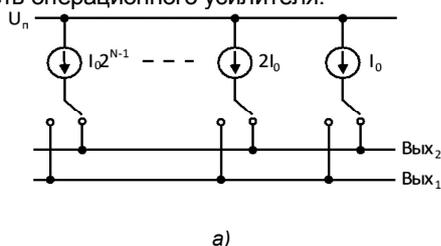


Рис. 1. Блок-схема N-разрядного ЦАП на источниках тока (а) и базовая ячейка такого ЦАП на РМОП-транзисторах (б): U_n – напряжение питания; Вых₁, Вых₂ – токовые выходы

Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность калибровки. Приведены способы минимизации влияния этих факторов в процессе калибровки.

Здесь предполагается, что все резисторы, показанные на рис. 2, являются линейными. Такое допущение можно считать вполне приемлемым, так как резисторы в КМОП-КНИ-технологии принято изготавливать на основе тонких пленок поликремния, которые в отличие от диффузионных резисторов не содержат рп-переходы, являющиеся основным источником нелинейности их характеристик.

Скважность тактового сигнала. Влияние скважности тактового сигнала можно оценить, если вычислить зависимость эффективного напряжения на конденсаторе C от длительности этого сигнала и его периода.

Нетрудно показать, что

$$\bar{U}_c \approx U_n \cdot \frac{\tau_1}{RC} \cdot \left[1 - \frac{(T - \tau_1)^2}{T \cdot RC} \right], \tag{1}$$

где \bar{U}_c – эффективное напряжение на конденсаторе C, U_n – напряжение питания, τ₁ и T – длительность и период тактового сигнала на выходе ГОИ, а R и C – параметры зарядовой помпы.

При T >> τ₁, что легко обеспечивается с помощью ГОИ, выражение (1) преобразуется в линейную зависимость, более удобную для практического анализа:

$$\bar{U}_c \approx U_n \cdot \frac{\tau_1}{RC} \cdot \left(1 - \frac{T}{RC} \right).$$

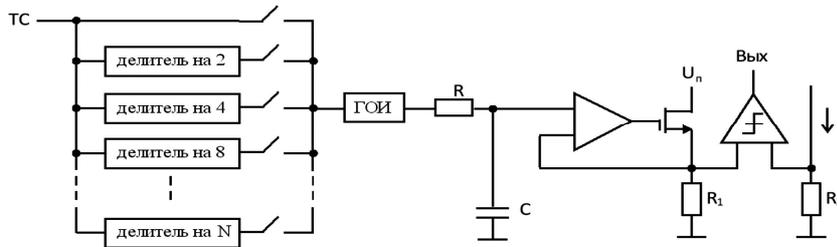


Рис. 2. Блок-схема, иллюстрирующая технику калибровки «весовых» токов: ТС – тактовый сигнал;

Вых – выход компаратора для контроля процесса калибровки; I_i – «весовой» ток; $R_1 = R_2$

Из этой зависимости следует, что в наиболее важном для практики интервале калибровки напряжение \bar{U}_c линейно уменьшается с ростом скважности тактового сигнала.

Утечка тока в конденсаторе C и его нелинейность. Утечка тока в конденсаторе C теоретически возможна по поверхности кристалла, через соседние структуры, например, через периферию резистора R и через собственный диэлектрик. Однако в контексте обсуждаемой проблемы, когда ток младшего разряда калибруемого КМОП-ЦАП может составлять лишь некоторую долю микроампера, токи утечки по поверхности кристаллов, созданных при использовании современных технологий, как правило, ничтожно малы.

Ток утечки через периферию резистора R маловероятен, так как этот резистор имеет поликремниевую структуру и располагается на диэлектрике, что, как уже отмечалось выше, не приводит к образованию p - n -переходов и, таким образом, к появлению токов утечки.

По тем же причинам собственный ток утечки конденсатора C так же не следует принимать во внимание, тем более что в типичном случае конденсатор C имеет структуру «металл-окисел-металл». В таких конденсаторах токи утечки обычно не превышают 1 нА. Даже при попадании одиночной частицы космического происхождения [3] при типичных значениях $C \approx 10$ пФ вряд ли следует ожидать существенного влияния возникшей утечки тока на \bar{U}_c .

Гораздо больший интерес с точки зрения влияния на \bar{U}_c представляет собственно структура конденсатора C , точнее, нелинейность конденсатора C , обусловленная этой структурой.

Если не вдаваться в теорию физических процессов в конденсаторном окисле и на его границах, то емкость конденсатора C можно представить в виде [4]

$$C \approx C_0 \cdot (1 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2), \quad (2)$$

где C_0 – емкость конденсатора при напряжении между его обкладками $U = 0$, а α_1, α_2 – эмпирические коэффициенты.

Выражение (2) используется в большинстве программ моделирования современных КМОП-микросхем, позволяя более точно рассчитывать переходные характеристики. По этой причине при калибровке КМОП-ЦАП необходимо делать поправку на \bar{U}_c при установлении окончательной величины «весового» тока.

Нелинейность операционного усилителя. Как и в случае конденсатора C нелинейность операционного усилителя (ОУ) необходимо учитывать при калибровке КМОП-ЦАП. Для минимизации нелинейности ОУ необходимо выполнить классические требования [2]. Согласно этим

требованиям коэффициент усиления ОУ без обратной связи (A_0) должен составлять

$$A_0 \approx 2^N, \quad (3)$$

где N – разрядность калибруемого КМОП-ЦАП.

При $N \geq 14-16$ бит условие (3) является достаточно жестким. Однако это цена, которую следует платить за обеспечение высокой точности, особенно при эксплуатации КМОП-ЦАП в составе космической аппаратуры. Отметим, что N -разрядный КМОП-ЦАП с выходом по напряжению уже должен иметь выходной ОУ с коэффициентом усиления согласно (3) и, следовательно, такой ОУ можно использовать при калибровке «весовых» токов.

Проблема может возникнуть при калибровке N -разрядного КМОП-ЦАП с токовым выходом. В этом случае при отсутствии в составе бортовой аппаратуры внешнего ОУ (что маловероятно), который можно использовать при калибровке КМОП-ЦАП, придется рассчитывать на фактическую точность процедуры калибровки.

Выводы

1. Аналитическое выражение, полученное для эффективного напряжения на конденсаторе зарядовой помпы, равного опорному напряжению, используемому при калибровке «весовых» токов, устанавливает однозначную связь этого напряжения с длительностью и периодом тактового сигнала.

2. Реальные токи утечки в конденсаторе зарядовой помпы (по поверхности кристалла, через периферию резистора и через собственный диэлектрик) ничтожно малы и поэтому не оказывают влияния на точность калибровки.

3. Нелинейности конденсатора зарядовой помпы и операционного усилителя являются основными факторами, которые могут оказать влияние на точность калибровки. Для минимизации этого влияния необходимо вводить поправки при вычислении опорных напряжений и использовать возможности периферийной аппаратуры.

Литература

1. Кононов В.С. Автоматическая калибровка многоразрядных КМОП-КНИ-ЦАП на источниках тока / В.С. Кононов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12. – №2. – С. 72-74.
2. Baker R.J. CMOS: Circuit Design, Layout and Simulation / R.J. Baker –IEEE Press, 2005. – 1039 p.
3. Анашин В.С. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / В.С. Анашин, В.В. Бодин, В.Ф. Герасимов [и др.]; под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2013. – 256 с.
4. Geerts Y. Design of multi-bit delta-sigma A/D converters / Y. Geerts, M. Steyaert, W. Sansen. – Kluwer Academic Publishers. – 2002. – 223 p.