

Программируемые аналоговые и аналого-цифровые интегральные схемы 5400TP035 и 5400TP094.

Особенности проектирования прецизионных схем и уменьшение влияния температурных эффектов

Юрий КОБЗЕВ,
к. т. н.
Роман НУРУЛЛИН
Дмитрий ИВАНОВ
mail@dcsoyuz.com

Программируемые аналоговые и аналого-цифровые интегральные схемы (ПАИС и ПАЦИС соответственно) представляют собой множество аналоговых и аналого-цифровых элементов, реализованных на одном кристалле. Для связи элементов между собой используются блоки коммутации, сформированные из коммутационных ключей, состояние которых определяется в процессе программирования. Микросхемы 5400TP035 и 5400TP094 позволяют значительно удешевить и ускорить процесс разработки схем аналоговой обработки сигналов, однако для проектирования прецизионных схем с использованием ПАИС требуется учитывать специфику конкретной микросхемы. В данной статье речь пойдет о микросхемах 5400TP035 и 5400TP094.

Введение

Для разработки схем с использованием микросхем 5400TP035 и 5400TP094 предназначено средство автоматизированного проектирования DCSElectric, предоставляющее возможность автоматического размещения и трассировки элементов в ПАИС, что значительно облегчает процесс проектирования схем.

Важно помнить, что стандартные алгоритмы автоматической трассировки направлены в первую очередь на разведимость схемы, а не на точность. В DCSElectric для трассировки по умолчанию используется алгоритм Дейкстры, который находит кратчайшие пути между элементами, учитывая только динамически изменяющиеся веса связей. Начиная с версии 1.1 в DCSElectric появилась возможность построения сбалансированных путей, то есть возможность использовать одинаковое количество коммутационных ключей при трассировке различных связей, помеченных разработчиком, что значительно упрощает проектирование прецизионных схем.

В статье на примере проектирования простого делителя напряжения в два раза показаны различные варианты построения схемы

в САПР. Для каждого варианта теоретически рассчитаны изменения выходных характеристик в зависимости от температуры, а также приведены практические результаты.

Постановка проблемы

В отличие от полностью заказных интегральных схем и от схем на дискретных элементах, в ПАИС и ПАЦИС для связи блоков предусмотрены коммутационные ключи, каждый из которых является аналоговым КМОП-ключом и обладает существенным сопротивлением (~700 Ом). Упрощенная макромодель ключа представлена на рис. 1. При построении прецизионных схем нельзя пренебрегать влиянием сопротивления ключей.

Одним из методов нивелирования влияния сопротивления ключей является четырех-

точный метод [1], который имеет существенный недостаток — использование большого количества внутренних ресурсов микросхемы. В ряде случаев метод может быть неприменим ввиду того, что диапазон входных напряжений операционных усилителей не rail-to-rail.

В статье предложены два альтернативных метода для уменьшения влияния коммутационных ключей:

- увеличение сопротивлений пассивных компонентов;
- использование сбалансированных цепей.

Описание теоретических вычислений

Интегральные резисторы отличаются друг от друга не более чем на 0,5% в пределах

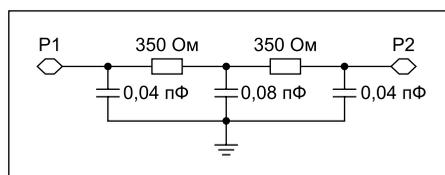


Рис. 1. Упрощенная макромодель открытого коммутационного ключа

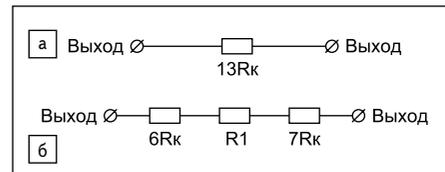


Рис. 2. Принципиальная схема для измерения:
а) сопротивления коммутационных ключей;
б) интегрального резистора

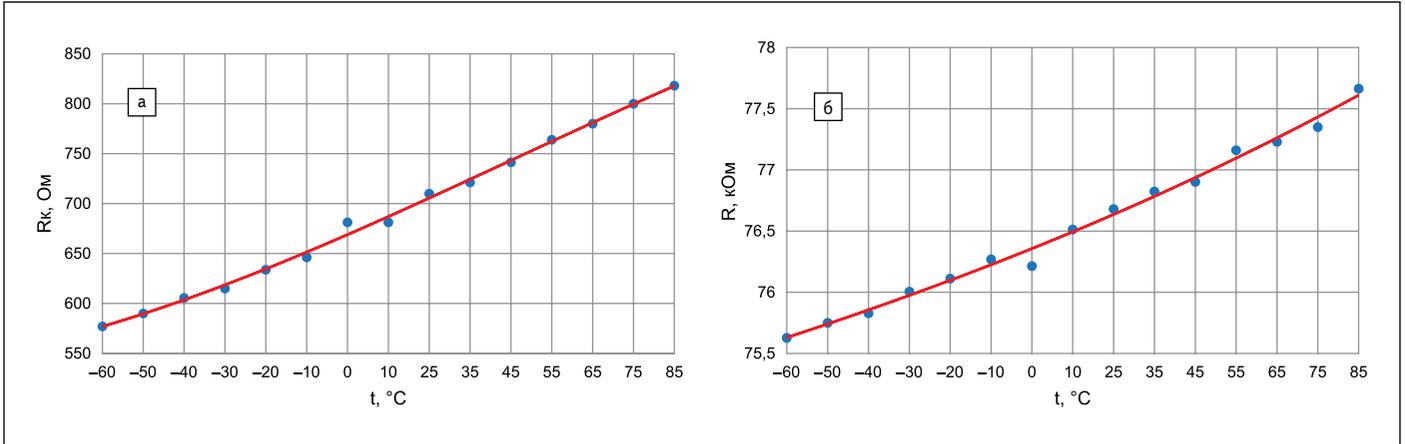


Рис. 3. Зависимость сопротивления от температуры: а) коммутационного ключа; б) интегрального резистора

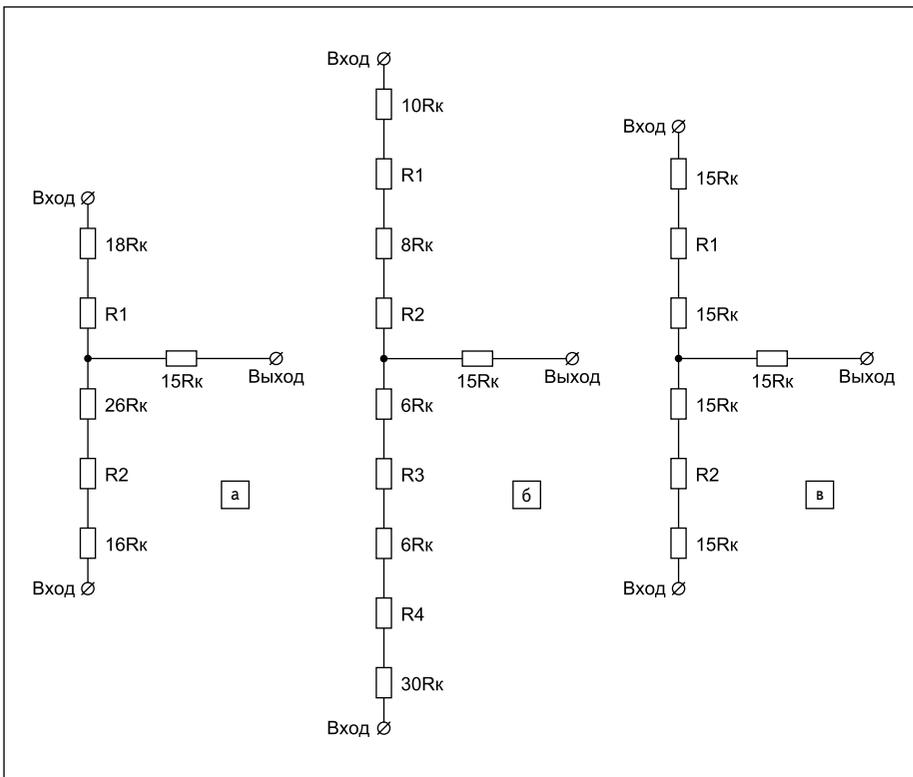


Рис. 4. Принципиальная схема резистивного делителя:
 а) созданного с помощью автоматической трассировки (схема 1);
 б) созданного с помощью автоматической трассировки с дополнительными резисторами (схема 2);
 в) построенного с помощью функции «Балансирование ключей» в САПР (схема 3)
Примечания. R1 = R2 = R3 = R4 — интегральные резисторы номиналом 80 кОм; Rк ≈ 700 Ом — сопротивление открытого коммутационного ключа.

со сбалансированными по количеству коммутационными ключами (схема 3), приведены на рис. 4.

Как можно видеть на рис. 4а, сопротивление верхнего плеча делителя не совпадает с сопротивлением нижнего плеча, соответственно, выходное напряжение будет отличаться от ожидаемого, а также из-за несовпадений температурных коэффициентов сопротивления резисторов и ключей будет значительно увеличено температурное смещение. Для уменьшения влияния температурной зависимости и паразитных составляющих коммутационных ключей были построены две схемы:

- резистивный делитель напряжения на интегральных резисторах с уменьшением влияния паразитных эффектов путем добавления дополнительного резистора в каждое плечо делителя (рис. 4б);
- резистивный делитель напряжения на интегральных резисторах с применением сбалансированных по сопротивлению цепей связи между блоками схемы (рис. 4в).

Теоретические значения напряжений на выходах схем 1–3 определяются формулой, где необходимо учитывать, что сопротивления R и R_k меняются в процессе изменения температуры:

$$U_{\text{вых}} = U_n + (U_B - U_n) \times \frac{x}{((R+xR_k) / ((2R+yR_k)))}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение схемы делителя; U_n — напряжение, приложенное к нижнему плечу резистивного делителя; U_B — напряжение, приложенное к верхнему плечу резистивного делителя; R — общее сопротивление интегральных резисторов верхнего или нижнего плеч резистивного делителя; R_k — сопротивление коммутационного ключа; x — количество коммутационных ключей нижнего плеча резистивного делителя; y — общее количество коммутационных ключей резистивного делителя.

Расчетные значения напряжений для каждой схемы представлены в таблице 1.

одной микросхемы и позволяют получить очень точные соотношения сопротивлений при построении делителей напряжения.

Сравним поведение характеристик сопротивления коммутационного ключа (рис. 2а) и интегрального резистора (рис. 2б) в температурном диапазоне $-60 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурная зависимость сопротивления коммутационных ключей и интегральных резисторов представлена на рис. 3.

В связи с тем, что микросхема не позволяет проложить путь от входной контактной площадки до выходной только через один ком-

мутационный ключ или один интегральный резистор — схемы, приведенные на рис. 2, имеют определенный набор дополнительных ключей. После измерения сопротивления данных схем во всем температурном диапазоне были вычислены сопротивления одного коммутационного ключа и одного интегрального резистора.

Пример схемы резистивного делителя напряжения, построенного с помощью автоматической трассировки (схема 1), с добавлением дополнительного резистора номиналом 80 кОм каждому из двух плеч (схема 2),

Таблица 1. Теоретические значения выходных напряжений

T, °C	U _{вых1} (схема 1), В	$\Delta U_{\text{вых1}}$ от U _э , %	U _{вых2} (схема 2), В	$\Delta U_{\text{вых2}}$ от U _э , %	U _{вых3} (схема 3), В	$\Delta U_{\text{вых3}}$ от U _э , %
-60	2,5372	1,488	2,5205	0,82	2,5	0
-50	2,5379	1,516	2,5209	0,836	2,5	0
-40	2,5386	1,544	2,5214	0,856	2,5	0
-30	2,5391	1,564	2,5216	0,864	2,5	0
-20	2,5399	1,596	2,5222	0,888	2,5	0
-10	2,5405	1,62	2,5225	0,9	2,5	0
0	2,5423	1,692	2,5236	0,944	2,5	0
+10	2,5422	1,688	2,5235	0,94	2,5	0
+25	2,5435	1,74	2,5244	0,976	2,5	0
+35	2,5439	1,756	2,5247	0,988	2,5	0
+45	2,5449	1,796	2,5253	1,012	2,5	0
+55	2,5458	1,832	2,5258	1,032	2,5	0
+65	2,5465	1,86	2,5263	1,052	2,5	0
+75	2,5474	1,896	2,5268	1,072	2,5	0
+85	2,548	1,92	2,5273	1,092	2,5	0

Примечания.

U_{вых1} — выходное напряжение схемы 1;
 U_{вых2} — выходное напряжение схемы 2;
 U_{вых3} — выходное напряжение схемы 3;
 U_э — эталонное напряжение 2,5 В.

Таблица 2. Экспериментальные значения выходных напряжений

T, °C	U _{вых1} (схема 1), В	$\Delta U_{\text{вых1}}$ от U _э , %	U _{вых2} (схема 2), В	$\Delta U_{\text{вых2}}$ от U _э , %	U _{вых3} (схема 3), В	$\Delta U_{\text{вых3}}$ от U _э , %
-60	2,537	1,48	2,5205	0,82	2,5015	0,06
-50	2,5372	1,488	2,5206	0,824	2,5013	0,052
-40	2,5375	1,5	2,5208	0,832	2,5011	0,044
-30	2,5378	1,512	2,5209	0,836	2,501	0,04
-20	2,5382	1,528	2,5211	0,844	2,5008	0,032
-10	2,5386	1,544	2,5214	0,856	2,5006	0,024
0	2,539	1,56	2,5216	0,864	2,5006	0,024
+10	2,5394	1,576	2,5218	0,872	2,5005	0,02
+25	2,5402	1,608	2,5222	0,888	2,5002	0,008
+35	2,5407	1,628	2,5225	0,9	2,5002	0,008
+45	2,5412	1,648	2,5228	0,912	2,5	0
+55	2,5419	1,676	2,5232	0,928	2,4999	0,004
+65	2,5423	1,692	2,5234	0,936	2,4997	0,012
+75	2,5429	1,716	2,5238	0,952	2,4998	0,008
+85	2,5434	1,736	2,5241	0,964	2,4997	0,012

Примечания.

U_{вых1} — выходное напряжение схемы 1;
 U_{вых2} — выходное напряжение схемы 2;
 U_{вых3} — выходное напряжение схемы 3;
 U_э — эталонное напряжение 2,5 В.

Таблица 3. Экспериментальные значения выходных напряжений схемы 4

T, °C	U _{вых4} (схема 4), В	$\Delta U_{\text{вых4}}$ от U _э , %
-60	2,482	0,72
-50	2,48	0,8
-40	2,4782	0,872
-30	2,4761	0,56
-20	2,4745	1,02
-10	2,4731	1,076
0	2,4717	1,132
+10	2,4707	1,172
+25	2,4694	1,224
+35	2,4682	1,272
+45	2,4672	1,312
+55	2,4663	1,348
+65	2,4654	1,384
+75	2,4647	1,412
+85	2,4639	1,444

Примечания.

U_{вых4} — выходное напряжение схемы 4;
 U_э — эталонное напряжение 2,5 В.

(1) можно заметить, что при значительном увеличении сопротивления уменьшается влияние коммутационных ключей.

Принимая во внимание вышеуказанные приемы, рассмотрим пример схемы, где температурные эффекты вносят существенный вклад в деградацию выходной характеристики. Принцип работы схемы на рис. 6 (схема 4) заключается в следующем: пилообразный сигнал 1–4 В со средней точкой 2,5 В и частотой 10 кГц подается на вход аналогового ключа, который тактируется частотой 5 кГц. При открытом ключе на выход поступает период пилообразного сигнала, а при закрытом срабатывает подтяжка к средней точке от резистивного делителя напряжения 2,5 В. Поскольку тактовая частота ключа в два раза меньше частоты входного сигнала, то при открытом аналоговом ключе выходом будет являться пилообразный сигнал, а при закрытом — выход делителя 2,5 В. Далее сигнал усредняется на внешней емкости в 1 мкФ.

В таблице 3 представлены экспериментальные данные выходных напряжений схемы 4.

В полном диапазоне температур смещение выходного напряжения составляет 18,1 мВ (табл. 3).

Делитель напряжения в схеме 4 используется в качестве подтягивающего элемента к средней точке при закрытии ключа. Однако

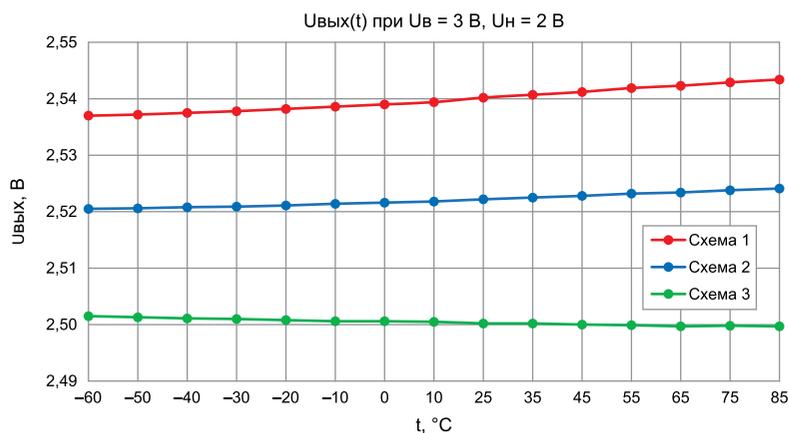


Рис. 5. Зависимости экспериментальных выходных напряжений схем 1–3 от температуры

Результаты эксперимента

Для сравнения результатов вычислений выходных напряжений схем на рис. 4 с экспериментальными данными были разработаны соответствующие схемы в САПР DCSElectric.

Полученные экспериментальные значения выходных напряжений для каждой схемы представлены в таблице 2.

На рис. 5 изображены графики зависимости экспериментальных выходных напряжений схем 1–3 от температуры при постоянном входном напряжении верхнего плеча делителя $U_v = 3$ В и при постоянном входном напряжении нижнего плеча делителя $U_n = 2$ В.

Как показывают данные на рис. 5, схема резистивного делителя со сбалансированными по сопротивлению цепями (схема 3) слабо за-

висит от температуры. Можно утверждать, что температурное смещение в схеме делителя с дополнительным сопротивлением (схема 2) в 2 раза ниже, чем в схеме делителя, построенного с помощью автоматической трассировки (схема 1). Также при рассмотрении формулы

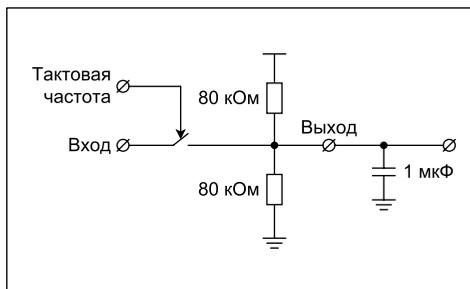


Рис. 6. Схема со значительным температурным смещением выходного напряжения (схема 4)

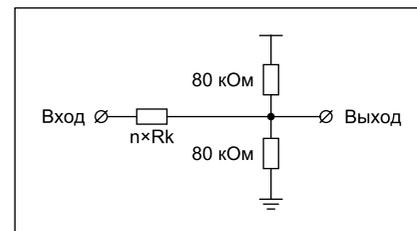


Рис. 7. Схема 4 при открытом аналоговом ключе, где n — количество коммутационных ключей, $R_k \approx 700$ Ом — сопротивление открытого коммутационного ключа

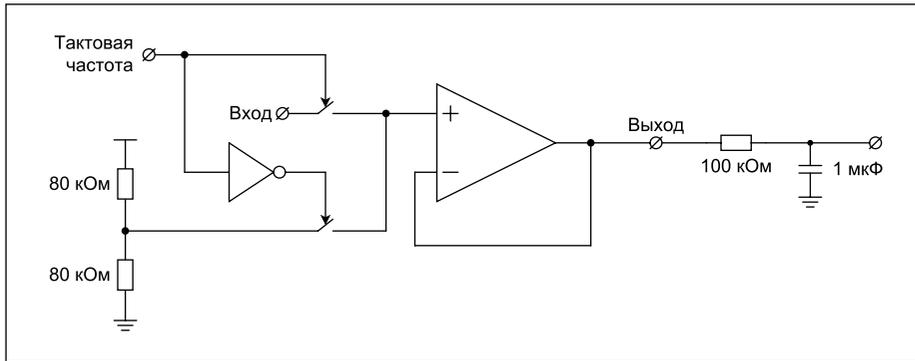


Рис. 8. Схема изолирования подтягивающего делителя напряжения от входного сигнала (схема 5)

Таблица 4. Экспериментальные значения выходных напряжений схемы 5

T, °C	U _{вых5} (схема 5), В	ΔU _{вых5} от U _э , %
-60	2,4974	0,104
-50	2,4973	0,108
-40	2,4973	0,108
-30	2,4972	0,112
-20	2,4973	0,108
-10	2,4974	0,104
0	2,4976	0,096
+10	2,4976	0,096
+25	2,4977	0,092
+35	2,4976	0,096
+45	2,4976	0,096
+55	2,4977	0,092
+65	2,4977	0,092
+75	2,4978	0,088
+85	2,4969	0,124

Примечания.

U_{вых5} — выходное напряжение схемы 5.
 U_э — эталонное напряжение 2,5 В.

в открытом состоянии аналогового ключа (рис. 7) делитель напряжения значительно искажает входной сигнал из-за разницы температурного коэффициента сопротивления ключей коммутации на пути входного сигнала и резисторов делителя.

Балансировка ключей в такой схеме улучшит результаты, но не приведет к полному устранению температурного смещения. В этом случае одним из вариантов решения является изолирование подтягивающего делителя напряжения от входного сигнала (рис. 8). В модифицированной схеме (схема 5) были заменены аналоговые ключи на ключи с компенсацией инжекции заряда и добавлен еще один аналоговый ключ для подключения опорного уровня 2,5 В с резистивного делителя напряжения. Два ключа тактируются противофазно. Выходная площадка сконфигурирована в качестве аналогового буфера. RC-цепь выполняет функцию фильтра нижних частот, усредняя сигнал на выходе аналогового буфера.

В таблице 4 представлены экспериментальные данные выходных напряжений схемы 5.

На рис. 9 изображена зависимость экспериментальных выходных напряжений схем 4 и 5 от температуры.

Выводы

При проектировании прецизионных схем в DCSElectric на 5400TP035 и 5400TP094 важно компенсировать паразитное влияние коммутационных ключей. Наиболее эффек-

тивным способом компенсации представляется четырехточечный метод, однако его использование не всегда возможно. На примере проектирования нескольких делителей напряжения показано, что использование больших сопротивлений позволяет ослабить влияние ключей, а построение схем, сбалансированных по количеству ключей, значительно уменьшает температурное смещение, вызванное их высоким температурным коэффициентом.

При проектировании прецизионных схем рекомендуется использовать схемотехнические решения, которые помогают уменьшить температурное смещение выходного сигнала путем разделения участков схемы

с различными температурными коэффициентами сопротивления друг от друга.

Литература

1. Эннс В. В, Кобзев Ю. М., Корепанов И. В. Разработка типовых решений аналоговой обработки с помощью программируемой аналоговой микросхемы КомПАС-1 (5400TP035) // Компоненты и технологии. 2016. № 12.

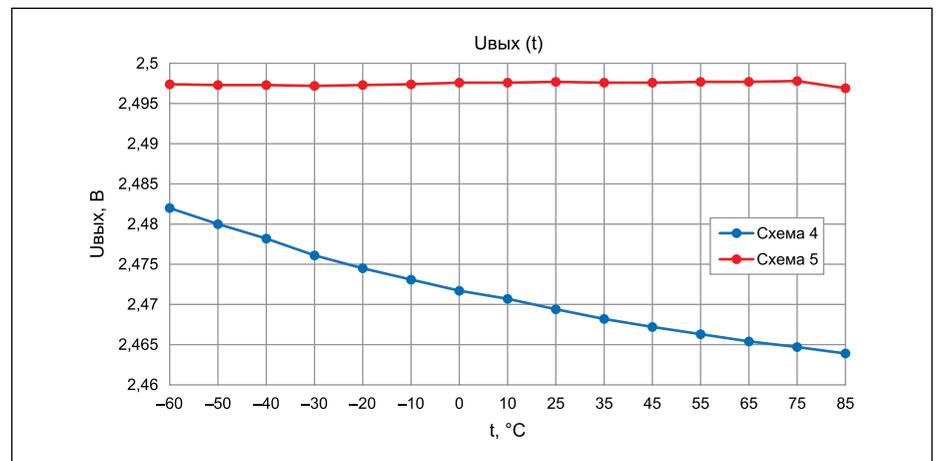


Рис. 9. Зависимость выходных напряжений схем 4 и 5 от температуры