

Микроконтроллер 1886BE6

для аналоговых систем

Алексей АЛЕКСЕЕВ
Сергей ШУМИЛИН

Компания ЗАО «ПКК Миландр» занимается разработкой отечественных микросхем для аппаратуры специального назначения, в том числе и нужд МО. В настоящее время разработано и освоено в серийном производстве большое количество различных компонентов, включенных в перечень МОП, среди которых можно отметить микроконтроллеры, схемы статической памяти, интерфейсные, радиочастотные и многие другие схемы.

Введение

Все разрабатываемые микросхемы отвечают жестким требованиям, предъявляемым к специальной элементной базе. Помимо самих микросхем, большое внимание уделяется и средствам разработки, и технической поддержке потребителей. Для этого компания разрабатывает и поставляет демонстрационно-отладочные комплекты, примеры программ и программные средства для разработки приложений. Основные характеристики микроконтроллеров серии 1886 представлены в таблице 1.

Описание микроконтроллера

Микроконтроллер 1886BE6 является развитием серии 1886 и предназначен для создания

устройств с точной аналоговой подсистемой, таких как различные химические и газоаналитические датчики, схемы управления питанием, системы освещения, противопожарная сигнализация и другие.

Структурная схема микроконтроллера представлена на рис. 1.

Микроконтроллер построен на RISC-ядре серии 1886 и программно совместим с ядром PIC17 фирмы Microchip. В отличие от других микроконтроллеров серии в новой разработке особое внимание уделено аналоговой составляющей. В частности, были реализованы новые блоки 12-разрядного ЦАП и компаратора. А также переработана схема АЦП с целью повышения точности результата преобразования.

Помимо новых аналоговых блоков, микроконтроллер имеет стандартный набор интер-

фейсных и периферийных блоков. Увеличена разрядность универсальных таймеров, что позволило повысить разрядность ШИМ до 18 бит. Также в микроконтроллере реализована энергонезависимая память данных EERPOM объемом 256 байт. 1886BE6 имеет механизм внутрисхемной отладки, что позволит отлаживать программы на микроконтроллере, установленном в аппаратуру.

В настоящее время фирма ЗАО «ПКК Миландр» выпустила экспериментальные образцы данной микросхемы. На фабрике было запущено 3 варианта кристаллов, отличающихся различными схемами реализации АЦП и ЦАП. И после получения образцов и их исследования были выбраны наиболее удачные схемотехнические решения.

Характеристики АЦП

Для проведения исследования напряжение аналогового питания ADCUcc и основного питания Ucc сделаем равным 4,096 В. (При этом значение единицы младшего разряда (EMR) будет равно 0,001 В, что позволит исключить погрешность, вносимую округлением.) Для сравнения исследуем один образец при напряжении аналогового питания ADCUcc и основного питания Ucc, равного 5,5 В. В соответствии с ОСТ110078.3-84 «Измерение параметров АЦП» на входной канал АЦП подается напряжение от 0 до 4,096 (5,5) В, с шагом 1/10 EMR. Последовательность действий для измерения будет следующая:

- установка напряжения на вход АЦП;
- выдача команды «старт преобразования»;
- ожидание преобразования;
- считывание результата преобразования.

Таким образом, для проведения исследования во всем диапазоне значений и расчета основных параметров АЦП, таких как интегральная нелинейность (ИНЛ), дифференциальная нелинейность (ДНЛ) и смещение нуля, потребуется выполнить 40 960 измерений. Параметры модуля будем анализировать по количеству результатов преобразо-

Таблица 1. Характеристики микроконтроллеров серии 1886

Параметр	1886BE1	1886BE2	1886BE3	1886BE4	1886BE5	1886BE6	1886BE7
Процессор	8-бит RISC	8-бит RISC	8-бит RISC	8-бит RISC	8-бит RISC	8-бит RISC	8-бит RISC
Тактовая частота, МГц	33	33	33	33	35	40	10
Питание ядра, В	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5
Питание портов, В	4,5–5,5	4,5–5,5	3,0–5,5	3,0–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5
Память программ	Mask ROM 32 К×16	FLASH 32 К×16	FLASH 32 К×16	FLASH 32 К×16	EEPROM 4 К×16	EEPROM 4 К×16	EEPROM 2 К×16
ОЗУ	902×8	902×8	902×8	902×8	902×8	902×8	902×8
Память данных, байт	нет	нет	EEPROM 256	EEPROM 256	EEPROM 256	EEPROM 256	EEPROM 256
Таймеры	4	4	1	1	3	3	1
Схема захвата	4	4	нет	нет	2	2	нет
ШИМ	3	3	нет	нет	2	2	нет
АЦП	12 каналов/ 10 разрядов	12 каналов/ 10 разрядов	нет	нет	8 каналов/ 10 разрядов	8 каналов/ 12 разрядов	нет
ЦАП	нет	нет	нет	нет	нет	2 канала/ 12 разрядов	нет
Компаратор	нет	нет	нет	нет	нет	есть	нет
USART	2	2	1	1	1+LIN	2+LIN	1+LIN
SPI	1	1	нет	1	нет	нет	нет
I2C	1	1	нет	нет	нет	нет	нет
USB	нет	нет	2 точки	4 точки	нет	нет	нет
CAN	нет	нет	нет	нет	6 буферов RX/TX	нет	нет
Специальные блоки	нет	нет	Блок поддержки ГОСТ 28147-89	нет	нет	нет	нет
Встроенный регулятор напряжения	нет	нет	U _{вх} = 5 В U _{вых} = 3,3 В I _{вых} = 40 мА	U _{вх} = 5 В U _{вых} = 3,3 В I _{вых} = 40 мА	нет	нет	U _{вх} = 5–16 В U _{вых} = 5 В I _{вых} = 10 мА
Температура, °С	–60...+85	–60...+85	–60...+85	–60...+85	–60...+85	–60...+125	–60...+125
Тип корпуса	H18.64	H18.64	H16.48 / LQFP 64	H16.48 / LQFP 64	H14.42	H16.48	H09.28
Статус	ОКР сдана	ОКР сдана	ОКР сдана	ОКР сдана	Опытные образцы	Опытные образцы	Опытные образцы

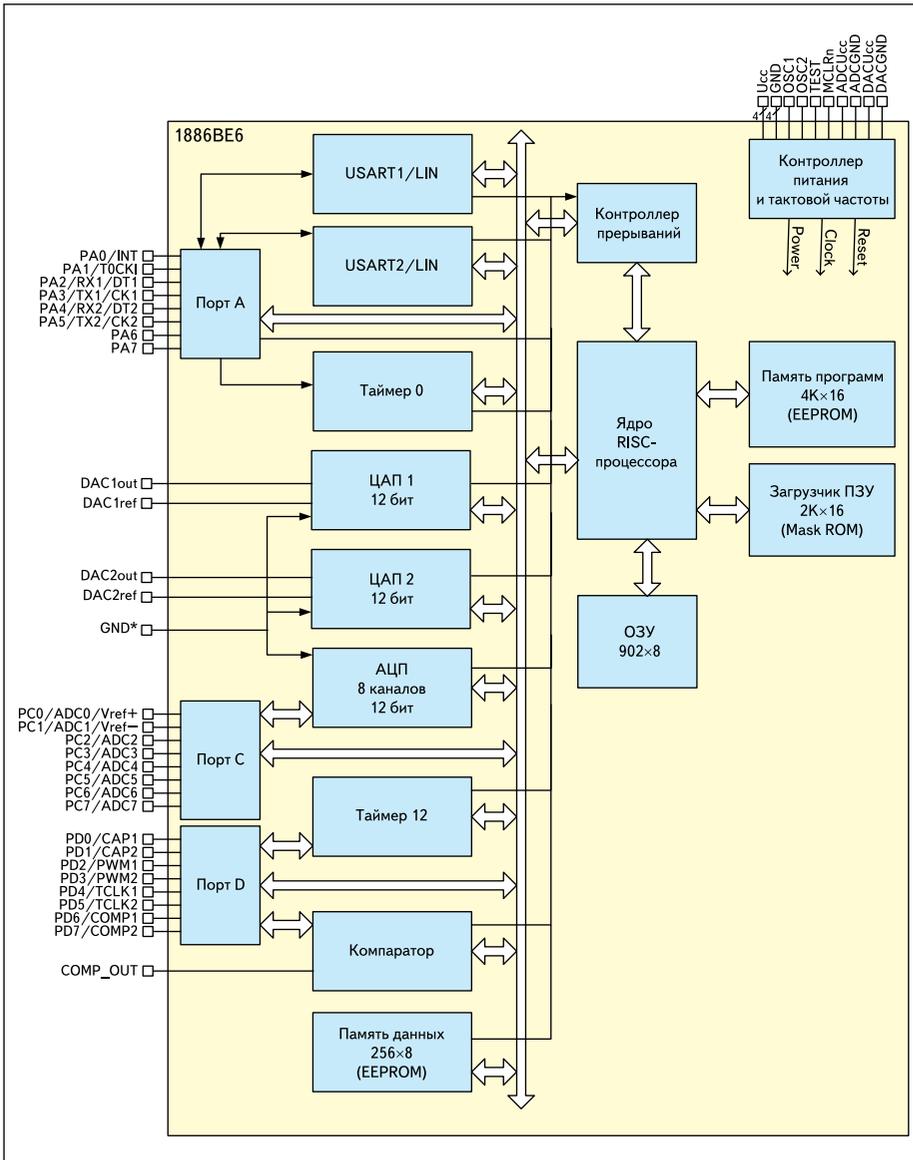


Рис. 1. Структура микроконтроллера 1886BE6

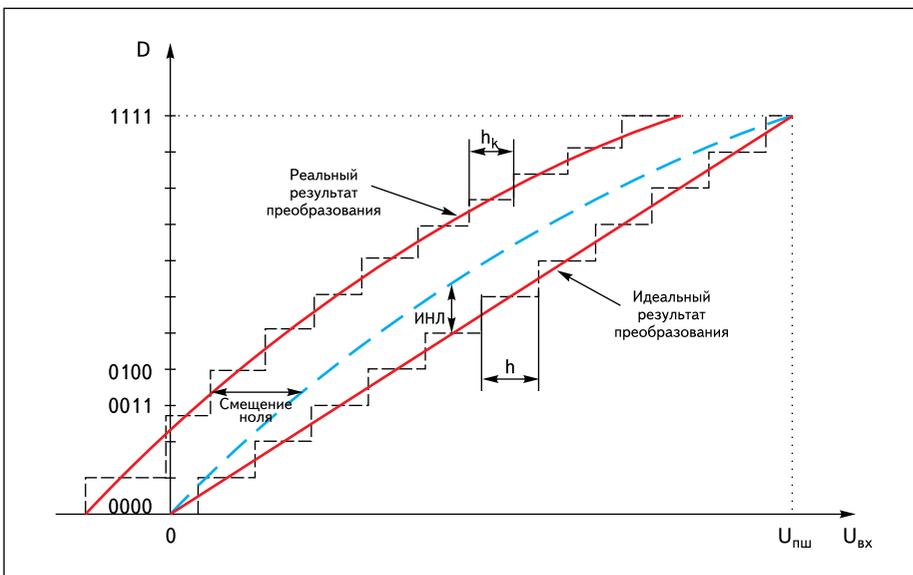


Рис. 2. Характеристика преобразования АЦП

вания, выпавших на каждый разряд, то есть в идеальном случае каждое значение, кроме нулевого, выпадет 10 раз, а нулевое — 5 раз. Измерения во всем диапазоне выполняются при различных значениях температуры: -60 , $+25$ и $+125$ °C.

Напомним основные параметры АЦП:

- Смещение нуля — значение $U_{вх}$, при котором выходной код АЦП равен нулю.
- ДНЛ характеризует разность между значением кванта преобразования h_k и средним значением кванта преобразования h .
- ИНЛ характеризует отклонение реальной функции преобразования от идеальной.

При последовательном возрастании значений входного аналогового сигнала $U_{вх}(t)$ от 0 до величины, соответствующей полной шкале АЦП $U_{пш}$, выходной цифровой сигнал $D(t)$ образует ступенчатую кусочно-постоянную линию. Такую зависимость обычно называют характеристикой преобразования АЦП. В отсутствие аппаратных погрешностей средние точки ступенек расположены на идеальной прямой (рис. 2), которой соответствует идеальная характеристика преобразования. Реальная характеристика преобразования может существенно отличаться от идеальной — формой и расположением на плоскости координат.

Поскольку одновременное представление в печатном виде большого объема значений, полученных при измерении АЦП, не наглядно, то были выбраны три области (в начале, середине и конце шкалы), на которых возможно рассмотреть полученные значения параметров АЦП.

На рис. 3–5 представлены начало, середина и окончание шкалы значений результата преобразования 12-разрядного модуля АЦП при напряжении питания 4,096 В.

Как видно, в начале шкалы результаты преобразования модуля близки к идеальному, в середине шкалы появляется некоторый разброс результатов преобразования в пределах 1-й единицы младшего разряда (ЕМР) во всем диапазоне температур, а в конце этот разброс достигает трех ЕМР, в основном, при нагреве кристалла.

Для наглядности рассмотрения отклонения реальных результатов преобразования от идеальных на рис. 6 представлена диаграмма значений ИНЛ, а на рис. 8 — диаграмма значений ДНЛ во всем диапазоне входных напряжений (от 0 до 4,096 В). Напомним, что в идеальном случае значение ИНЛ и ДНЛ всегда равно нулю. Для оценки характеристик модуля при напряжении питания 5,5 В на рис. 7 приведена диаграмма значений ИНЛ, а на рис. 9 — диаграмма значений ДНЛ во всем диапазоне входных напряжений (от 0 до 5,5 В).

Диаграммы показывают, что значение ДНЛ уверенно держится в диапазоне температур и входных напряжений в пределах 0,8 ЕМР, а значение ИНЛ с ростом температуры увеличивается и достигает трех ЕМР при температуре $+125$ °C и напряжении питания 4,096 В. При увеличении напряжения питания до 5,5 В

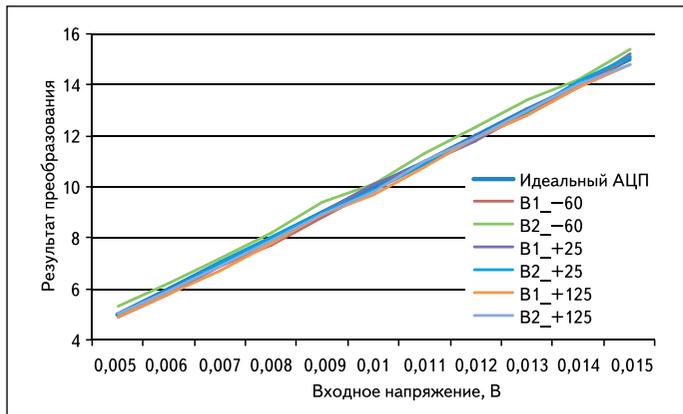


Рис. 3. Начало шкалы

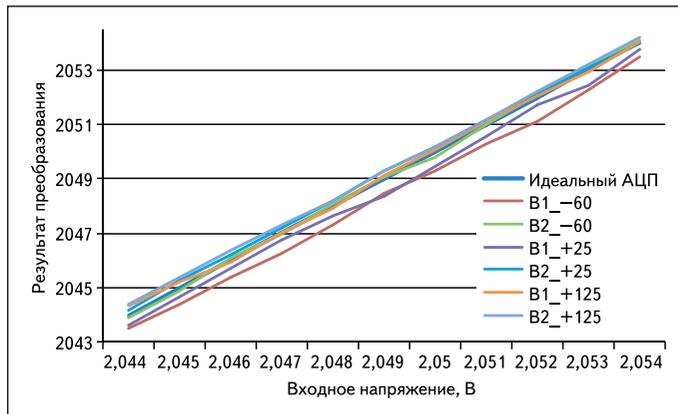


Рис. 4. Середина шкалы

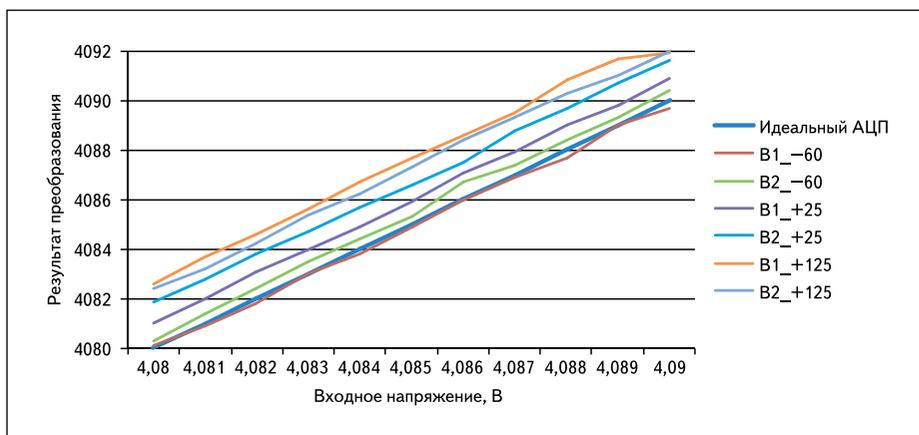


Рис. 5. Конец шкалы

щении, при температуре -60 , $+25$, $+125$ °С. Дополнительно делались измерения при резистивной нагрузке. Для разных условий измерений проводилось различное число измерений.

Для определения статических параметров снималась передаточная характеристика ЦАП. То есть при фиксированном опорном напряжении последовательно подавались все значения входных кодов и снималось выходное напряжение на выходе ЦАП. Полученные данные потом использовались для расчетов статических параметров. В качестве опорного напряжения во всех случаях использовалось напряжение 4,096 В. Тогда ЕМР составляет 1 мВ, то есть во всех дальнейших расчетах, если не указано иное, используется значение $EMR = 1$ мВ.

Пример начала передаточной характеристики — все 3 варианта (8 кристаллов) при одной температуре — приведен на рис. 10. По оси x значения кодов (реальное значение равно значению на оси — 1, то есть начальный код — нулевое значение, недостаток связан с особенностью отображения в MATLAB). Значение по оси y — в милливольтках. Красная кривая — это передаточная характеристика идеального ЦАП.

незначительно увеличивается значение ДНЛ, но пропадает температурная зависимость ИЛН, на что необходимо обратить внимание при проектировании устройств, использующих результаты модуля АЦП.

Характеристики ЦАП

В контроллере стоит два 12-разрядных ЦАП, есть возможность использовать внутренних или внешний источник опорного напряжения. В исследуемой тестовой партии кристаллов — 3 варианта ЦАП, одинаковых со схемотехнической точки зрения, но разных в плане топологической реализации. Измерялось 3 образца 1-го варианта ($n1_0$, $n1$, $n2$), 3 образца 2-го варианта ($n3_1$, $n3$, $n4$), 2 образца 3-го варианта ($n5$, $n6$).

Для проведения исследования напряжение аналогового питания ADCUсс и основного питания Uсс сделаем равным 4,096 В (при этом значение ЕМР будет равно 0,001 В, это позволит исключить погрешность, вносимую округлением). В соответствии с ОСТ-110078.1-84 «Измерение параметров ЦАП» в регистр значения выходного напряжения ЦАП будут устанавливаться значения от 0 до 4095, с шагом $1/10$ ЕМР. Последовательность действий для измерения следующая:

- установка напряжения на выходе ЦАП;

- выдача команды измерения напряжения;
- ожидание измерения.

Таким образом, для проведения исследования во всем диапазоне значений и расчета основных параметров ЦАП, таких как интегральная нелинейность (ИНЛ), дифференциальная нелинейность (ДНЛ) и значение единицы младшего разряда, потребуется выполнить 4096 измерений. Измерения проводились при внутреннем и внешнем сме-

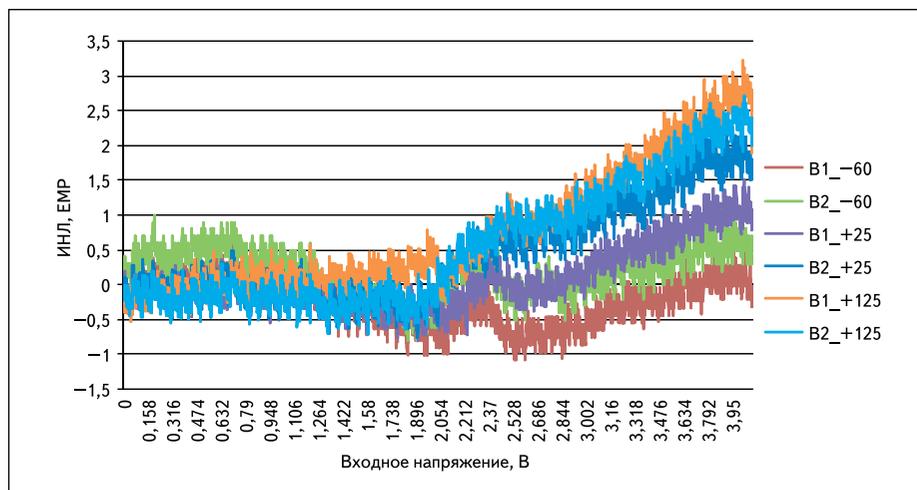


Рис. 6. ИНЛ (напряжение питания 4,096 В)

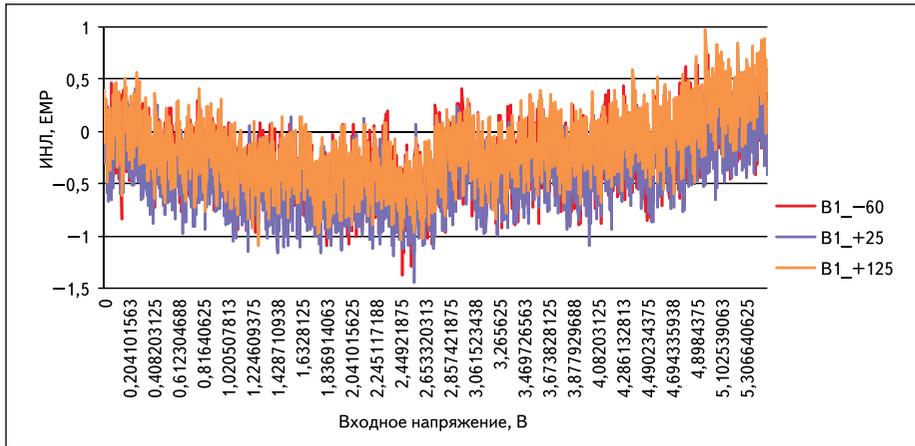


Рис. 7. ИНЛ (напряжение питания 5,5 В)

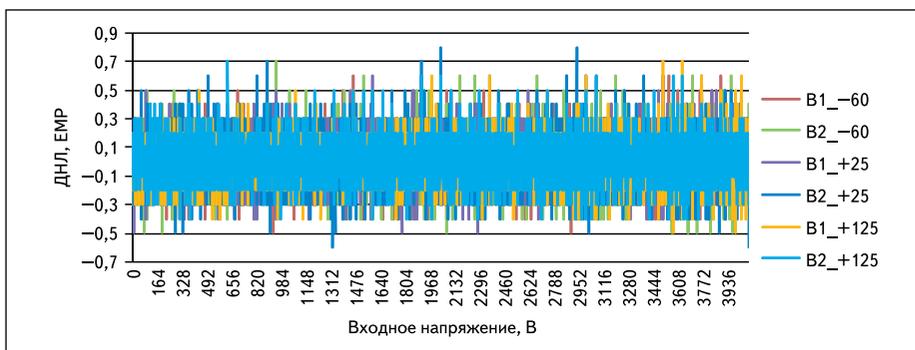


Рис. 8. ДНЛ (напряжение питания 4,096 В)

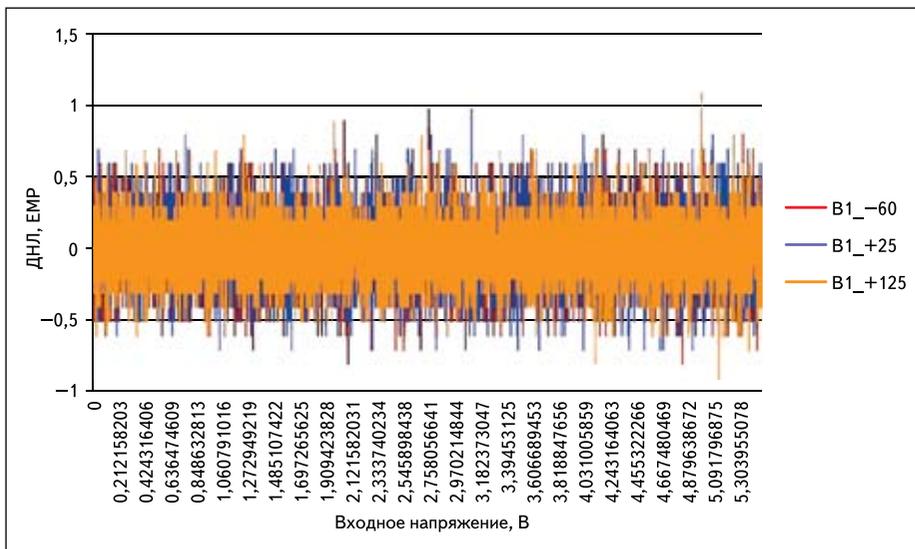


Рис. 9. ДНЛ (напряжение питания 5,5 В)

Таблица 2. Сводная таблица значений ИНЛ для первого ЦАП при внутреннем и внешнем смещении, при различной температуре (значение ИНЛ приводится в ЕМР)

№ кристалла	-60 °С, внутренний	-60 °С, внешний	25 °С, внутренний	25 °С, внешний	125 °С, внутренний	125 °С, внешний
n1_0 (в1)	2,26	1,64	1,14	2,45	2,09	1,79
n1(в1)	2,39	2,18	1,86	2,05	2,25	1,93
n2(в1)	1,19	2,55	2,38	2,07	0,88	1,90
n3_1(в2)	0,87	1,57	0,89	1,67	0,681	1,84
n3(в2)	1,39	2,00	1,44	2,07	1,20	2,20
n4(в2)	1,65	1,64	1,63	1,74	1,57	1,87
n5(в3)	2,84	брак/утечка	2,11	2,73	1,73	2,34
n6(в3)	2,52	2,63	1,48	2,27	1,95	2,12

Видно значительное смещение нуля и насыщение минимальных кодов. Для максимальных кодов насыщения замечено не было.

Расчет дифференциальной нелинейности (ДНЛ)

Расчет выполнялся по следующей формуле:

$$ДНЛ(i) = (x(i+1)-x(i))/ЕМР-1,$$

где $x(i)$ — выход ЦАП для i -го входного кода.

График зависимости приведен на рис. 11.

На рис. 11 видны большие значения дифференциальной нелинейности (до -1 ЕМР) для начальных кодов. Это связано с насыщением передаточной характеристики. Если учитывать коды после 10-го, то максимальное значение ДНЛ не превышает $\pm 0,07$ ЕМР.

Расчет интегральной нелинейности (ИНЛ)

Расчет выполнялся по следующей формуле:

$$ИНЛ(i) = x(i)/ЕМР-i,$$

где $x(i)$ — выход ЦАП для i -го входного кода.

Эта формула дает чистое отклонение (с учетом смещения нуля) для i -го кода в ЕМР.

На рис. 12 виден скачок ИНЛ для начальных кодов и значительное смещение. Фактическое значение ИНЛ (без смещения) определялось как разница между максимальным и минимальным значением, деленная на два (максимальное и минимальное значение ИНЛ определялось без учета первых 10 и последних 10 кодов) (табл. 2).

Для второго ЦАП получены аналогичные данные.

Альтернативный метод расчета ИНЛ (best fit method)

Суть расчета состоит в том, что выбирается наилучшая кривая, относительно которой рассчитывают ДНЛ, ИНЛ (табл. 3), offset.

В данном методе передаточные ЦАП представляют собой прямые с примерно постоянным наклоном (рис. 13), за исключением нескольких начальных кодов, для которых при отрицательном смещении наблюдается насыщение. За наилучшую кривую целесообразно выбрать прямую между 10-м кодом и последним 4095-м кодом, то есть исключить первые 10 кодов (иногда выбирают кривую, соединяющую крайние коды передаточной характеристики).

Тогда формула для расчета ИНЛ примет вид:

$$ИНЛ(i) = [x(i)-x(10)-(i-10) \times ЕМР]/ЕМР.$$

Соответственно определяется новое значение $ЕМР = [x(4096)-x(10)]/4096$.

Расчет ошибки смещения (offset)

Ошибка смещения рассчитывалась как разница между идеальным значением кода середины 2047 (то есть 2047 В) и измеренным значением кода 2047 (табл. 4).

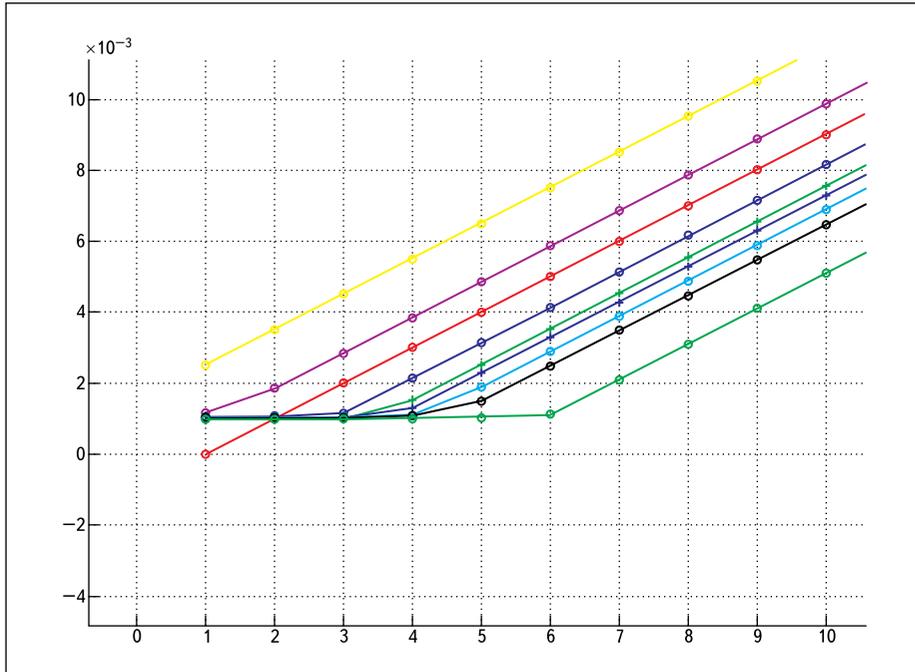


Рис. 10. Пример начала передаточной характеристики (все 3 варианта (8 кристаллов) при одной температуре)

жения коэффициента передачи). Подводка «земли» сделана более надежно, и значительно подъема младших кодов не наблюдается.

Диапазон выходного напряжения ЦАП

Нижние значения выходного напряжения ограничиваются значениями примерно 2–3 мВ (предположительно это связано со смещением [усилителя] в плюс). Кроме того, на некоторых образцах наблюдается насыщение первых кодов (до 6), когда выдается постоянное значение около нуля (предположительно это связано со смещением в минус).

Верхние значения выходного напряжения ограничиваются значением до $V_{ref} = 9\text{ мВ}$ (предположительно это связано с падением напряжения на ключе разводки и смещением в минус). При низких напряжениях питания из-за увеличения сопротивления ключей верхнее ограничение напряжения возрастает.

Время перехода с нулевого уровня для всех вариантов кристаллов составляет порядка 2 мкс. Предполагается, что время включения ЦАП также не превышает 2 мкс.

Ток потребления одного ЦАП при использовании внутренней опоры достигает 600 мкА. Это ток потребления матрицы и усилителя. Ток потребления одного ЦАП

Виден некоторый перекося смещения в сторону отрицательных значений. Предполагается, что это может быть связано с «просадкой»

старших кодов (из-за падения на ключе/разводке в цепи верхней опоры и, соответственно, уменьшения полного диапазона сверху и иска-

Таблица 3. Сводная таблица значений ИНЛ для первого ЦАП при внутреннем и внешнем смещении, при различной температуре (значение ИНЛ приводится в ЕМР)

№ кристалла	-60 °С, внутренний	-60 °С, внешний	25 °С, внутренний	25 °С, внешний	125 °С, внутренний	125 °С, внешний
n1_0 (a1)	1,53	1,31	1,22	1,34	1,19	0,95
n1(a1)	2,24	1,93	1,71	1,70	1,99	1,54
n2(a1)	1,41	2,83	2,49	2,48	0,93	2,07
n3_1(a2)	0,97	0,92	0,46	0,56	0,35	0,39
n3(a2)	1,21	1,31	0,92	0,97	0,61	0,71
n4(a2)	1,03	1,11	1,03	0,89	0,69	0,75
n5(a3)	2,65	брак	1,78	1,81	1,12	1,01
n6(a3)	2,20	2,14	1,66	1,43	1,45	1,39

Таблица 4. Сводная таблица ошибки смещения для первого ЦАП при различных значениях смещения и температуры (приводится ошибка смещения в мВ)

№ кристалла	-60 °С, внутренний	-60 °С, внешний	25 °С, внутренний	25 °С, внешний	125 °С, внутренний	125 °С, внешний
n1_0 (a1)	-2,80	-4,08	-2,85	-3,09	-2,24	-3,30
n1(a1)	-3,86	-4,83	-4,24	-5,05	-3,09	-4,97
n2(a1)	-2,95	-1,24	-9,40	-1,78	-3,46	-1,70
n3_1(a2)	1,51	0,18	0,51	-0,30	1,15	-1,18
n3(a2)	-6,60	-0,88	0,33	-0,56	-5,92	-0,26
n4(a2)	-2,81	-4,23	-4,05	-4,87	-3,76	-5,20
n5(a3)	-0,46	-4,38	-3,43	-4,17	-1,34	-5,00
n6(a3)	0,56	-3,10	-2,99	-3,84	-1,54	-4,64

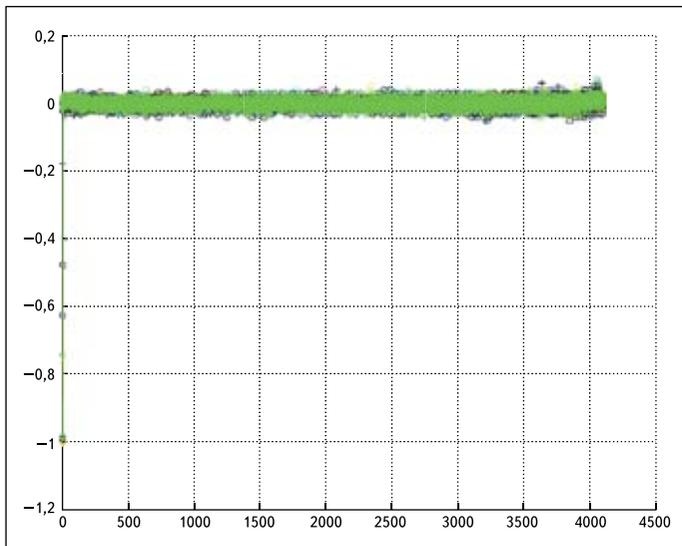


Рис. 11. Пример зависимости дифференциальной нелинейности от входных кодов (по оси x входные коды, по оси y — ДНЛ в ЕМР)

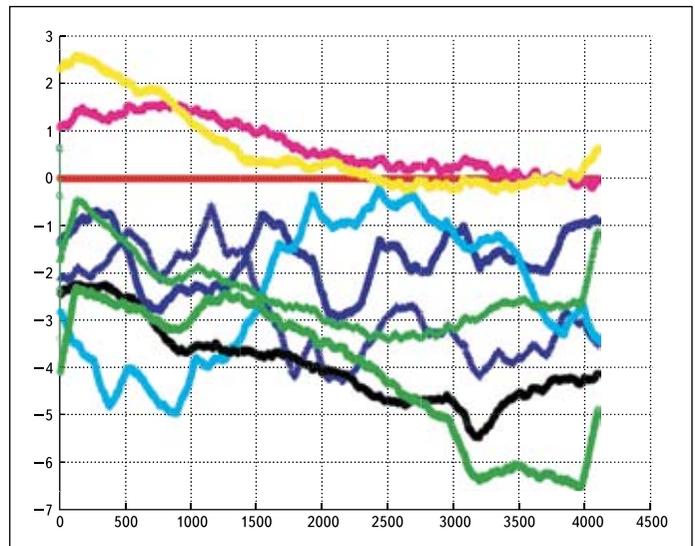


Рис. 12. Пример зависимости интегральной нелинейности от входных кодов (по оси x входные коды, по оси y — ИНЛ в ЕМР): красный — идеальный ЦАП; два синих и голубой — вариант 1; малиновый, желтый, черный — вариант 2; два зеленых — вариант 3

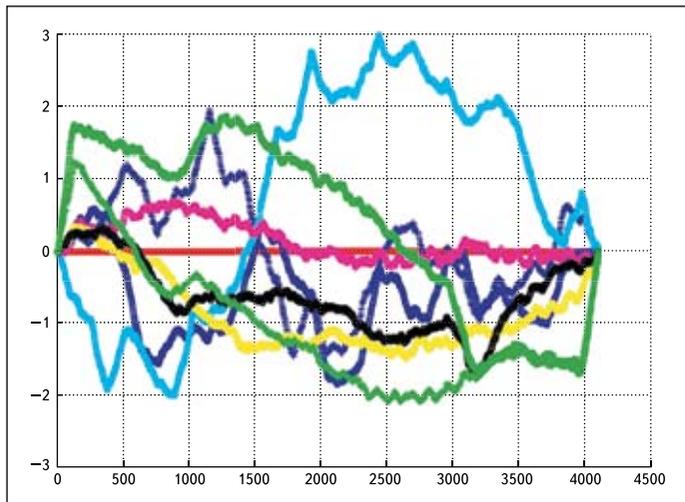


Рис. 13. Примеры зависимости ИНЛ по альтернативному методу (по оси x входные коды, по оси y — ИНЛ в ЕМР): красный — идеальный ЦАП; два синих и голубой — вариант 1; малиновый, желтый, черный — вариант 2; два зеленых — вариант 3

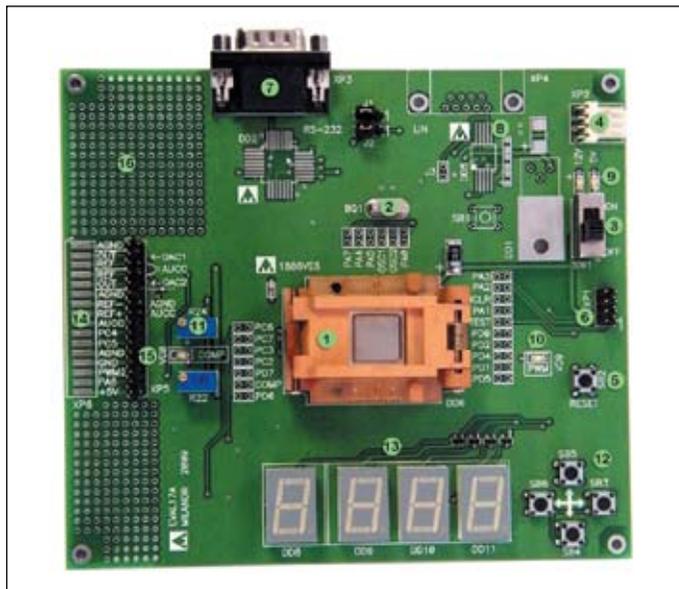


Рис. 14. Внешний вид отладочной платы для микроконтроллера 1886BE6

достигает 300 мкА при использовании внешней опоры. Таким образом, ток потребления матрицы составляет 300 мкА, который поступает от источника опоры.

Заключение

После проведения исследований всех вариантов экспериментальных образцов микроконтроллера 1886BE6 будет проведена корректировка окончательного варианта, в ко-

тором будут применены наиболее удачные топологические решения реализации модулей, например, модуль АЦП из варианта № 1 и модуль ЦАП из варианта № 2. Остальные характеристики микроконтроллера 1886BE6 представлены в таблице 1.

В настоящее время фирма ЗАО «ПКК Миландр» разработала и поставляет демонстрационный отладочный комплект Eval17 для микроконтроллера 1886BE6. Внешний вид платы представлен на рис. 14.

Стоит отметить, что в настоящее время отечественных микроконтроллеров с такими характеристиками аналоговых блоков не существует. Микроконтроллер 1886BE6 соответствует мировому уровню, а с учетом рабочего температурного диапазона и превосходит аналоги зарубежных фирм. Демонстрационный отладочный комплект можно приобрести в компании ЗАО «ПКК Миландр», а варианты экспериментальных образцов микроконтроллеров 1886BE6 выдаются бесплатно. ■