

Новая специализированная ИС с элементами Холла

для датчиков тока компенсационного типа, имеющая малое напряжение смещения

Фабрис Сальви
(Fabrice Salvi)

fsa@lem.com

Датчики тока компенсационного типа на базе полупроводниковых элементов Холла были разработаны для того, чтобы преодолеть ограничения, свойственные даже самым лучшим датчикам прямого усиления. В частности, это касается таких характеристик, как отношение сигнал-шум, время нарастания переходной характеристики и температурный дрейф чувствительности. Но у компенсационных датчиков есть свой недостаток: ненулевое напряжение смещения при нулевом значении измеряемого тока. В этой статье рассмотрена новая специализированная ИС (ASIC) с интегрированными на кристалле элементами Холла. В ней применен патентованный метод компании LEM, позволяющий значительно снизить напряжение смещения и его дрейф по сравнению с прежними схемотехническими решениями. Новая функциональность описываемой ИС включает в себя процедуру размагничивания при подаче питания, обнаружение перегрузки по току

с выбором порога срабатывания и программирование для конечного пользователя. Новая специализированная ИС представлена на рис. 1.

Введение

На рис. 2 показан принцип действия компенсационных датчиков тока, основанный на измерении магнитной индукции, которая создается измеряемым током в магнитопроводе. Первичными измерительными преобразователями служат встроенные в специализированную ИС элементы Холла. Преимущества такой конструкции — развязка от измеряемого тока и широкий диапазон частот, включая постоянный ток. Элементы Холла изготавливаются по стандартной КМОП-технологии, поэтому дополнительного удорожания ИС не происходит.

На постоянном токе и на низких частотах (до нескольких килогерц) магнитная индукция воспри-

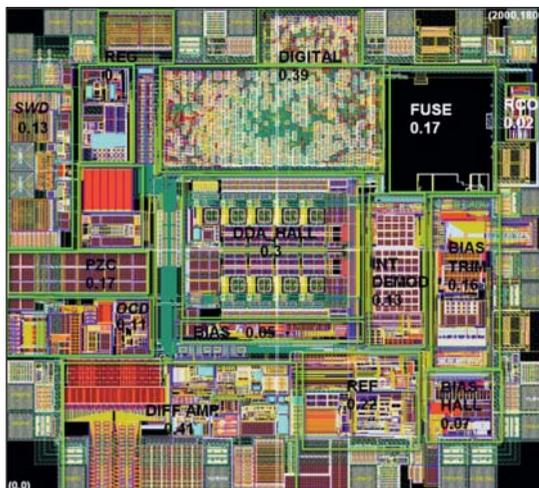


Рис. 1. Специализированная ИС

Размеры кристалла 1,8×2,0 мм²
Технологический процесс: КМОП 0,35 мкм

- * 9 элементов Холла (8 активных)
- * 5000 логических вентилях для цифрового блока
- * 128 плавких перемычек в качестве однократно программируемой энергонезависимой памяти

нимается элементами Холла, в результате чего через вторичную обмотку и измерительный резистор R_M протекает ток I_S , который компенсирует магнитный поток измеряемого тока. На более высоких частотах датчик работает как пассивный трансформатор тока, и I_S компенсирует магнитный поток тока I_P за счет трансформаторного эффекта. I_S может непосредственно подаваться на выход в датчиках с токовым выходом или преобразовываться в напряжение с помощью измерительного резистора R_M и затем усиливаться в датчиках с выходным сигналом в виде напряжения (на рис. 2 усилитель напряжения не показан). Точное значение чувствительности элементов Холла не играет роли, так как они включены в цепь обратной связи. И если коэффициент усиления разомкнутой цепи обратной связи достаточно велик, значение чувствительности элементов Холла не влияет на общую точность датчика.

На частотах выше нескольких килогерц ток во вторичной обмотке возникает непосредственно за счет трансформаторного эффекта. Это позволяет сократить время нарастания переходной характеристики до уровня, ограниченного лишь параметрами паразитных элементов (резонансной частотой) обмотки и полосой пропускания усилителя напряжения. Более того, шумы от элементов Холла вносят вклад в общий выходной шум только на низких частотах, где не проявляется трансформаторный эффект, а полоса частот сигнала при этом остается широкой. В этом состоит важнейшее преимущество компенсационной схемы.

Чтобы снизить смещение и фликкер-шум элемента Холла, его выходной сигнал модулируется с высокой частотой (1 МГц) путем последовательного придания элементу Холла смещения в двух ортогональных направлениях («вращение» [1]), а затем усиливается и демодулируется.

Новая специализированная ИС, описываемая в этой статье, сводит к минимуму количество электронных компонентов, необходимых для построения компенсационного датчика тока с выходным сигналом в виде напряжения: это всего три керамических конденсатора и один измерительный резистор. Датчик с токовым выходом, разумеется, не содержит измерительного резистора, так как последний располагается на стороне потребителя. На рис. 3 показана схема компенсационного датчика тока с выходным сигналом в виде напряжения.

Если не хватает выходного напряжения (максимум 5 В) и/или тока (максимум 150 мА) встроенного драйвера, можно использовать внешний драйвер с напряжением питания ± 15 В. Обычно к этому прибегают при измерении больших токов (более 500 А), когда ток вторичной обмотки может превышать 1 А. Именно так работают новые компенсационные датчики Холла LF xx10, в которых применена описываемая специализированная ИС.

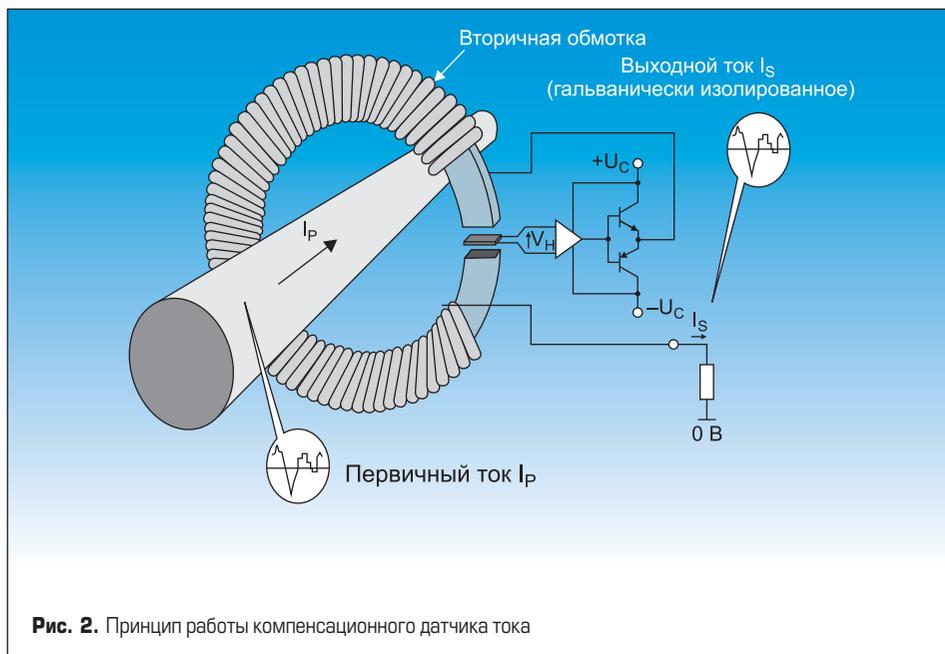


Рис. 2. Принцип работы компенсационного датчика тока

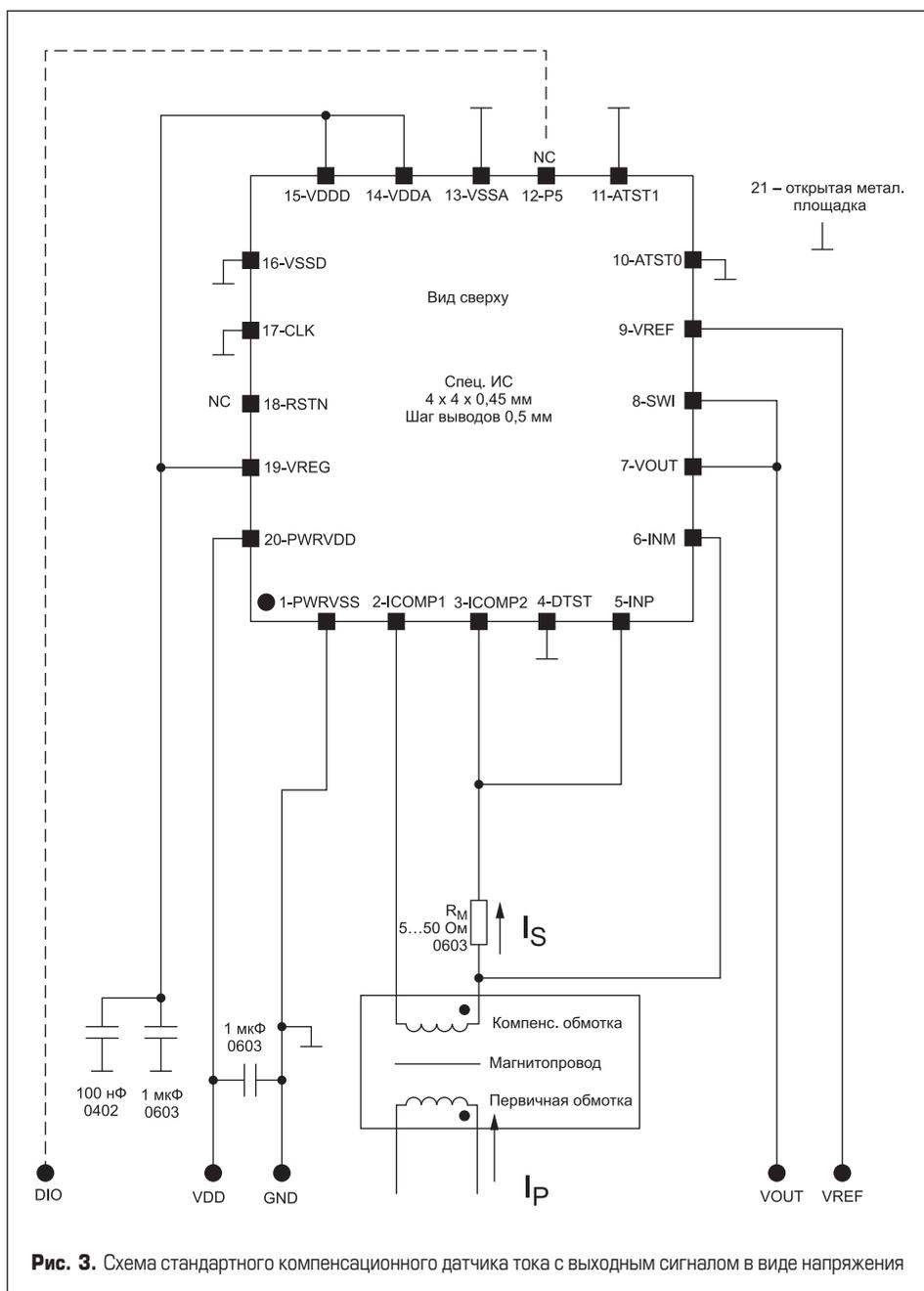


Рис. 3. Схема стандартного компенсационного датчика тока с выходным сигналом в виде напряжения

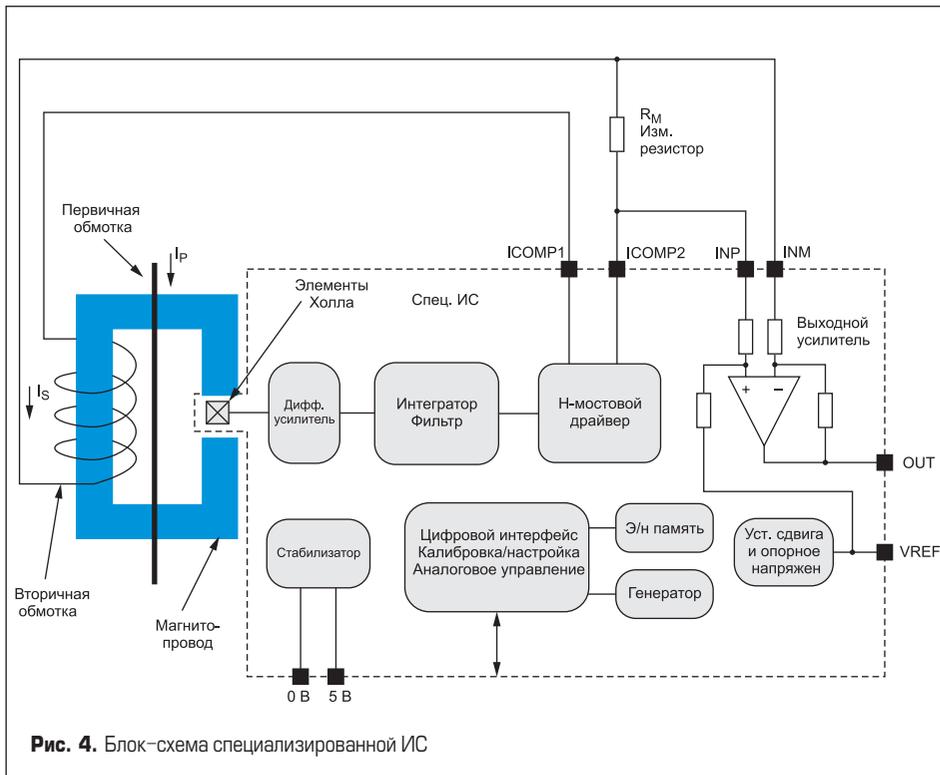


Рис. 4. Блок-схема специализированной ИС

Архитектура специализированной ИС

Блок-схема специализированной ИС приведена на рис. 4.

Использование восьми элементов Холла позволяет повысить отношение сигнал-шум в начале сигнальной цепочки в $\sqrt{8}$ раз. Уровень сигнала увеличивается в 8 раз, тогда как уровень шума возрастает лишь в $\sqrt{8}$ раз. За счет «вращения» на частоте 1 МГц устраня-

ются в первом порядке смещение и фликкер-шум элемента Холла.

Рис. 5 иллюстрирует хорошо известный принцип «вращения» тока. Он позволяет отделить переменный сигнал от постоянного смещения, если смещение одинаково в обеих последовательных фазах. Но у этого метода есть два недостатка:

- информация о сигнале содержится в двух фазах, поэтому существует задержка;

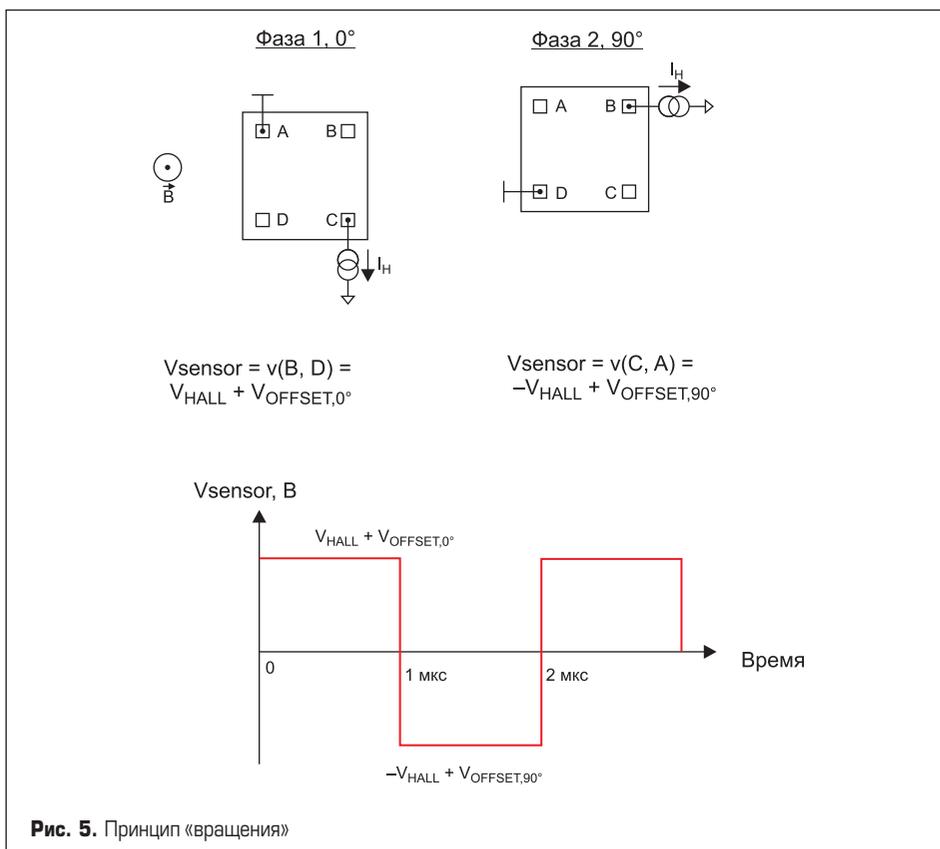


Рис. 5. Принцип «вращения»

- если сигнал после «вращения» демодулируется на исходную частоту путем дискретизации, возникает дополнительный шум в виде помех дискретизации.

Затем напряжение смещения V_{OFFSET} отделяется от напряжения сигнала V_{HALL} с помощью демодулятора, который работает как ВЧ-фильтр.

Выходной сигнал элементов Холла, модулированный частотой «вращения» (1 МГц), усиливается дифференциально-разностным усилителем (DDA), а затем подается на блок демодулятора/интегратора, выполненных в одном каскаде по схеме с коммутируемыми конденсаторами. Коэффициент усиления разомкнутой цепи обратной связи на постоянном токе определяется в основном интегратором.

Драйвер класса АВ (H-мостовой) вырабатывает ток во вторичной обмотке (до 150 мА) с отсутствием искажений типа «ступенька». Его схема построена на базе H-моста, благодаря чему размах выходного напряжения может достигать ± 5 В за вычетом падения напряжения на МОП-ключках (сопротивлением около 5 Ом). Упрощенная схема драйвера показана на рис. 6.

Для обеспечения устойчивости контура обратной связи необходима фазовая коррекция, так как на низких частотах преобладают два полюса, один из которых обусловлен обмоткой, а другой — интегратором. По этой причине в контур введена схема компенсации полюсов нулями.

После преобразования тока в напряжение на измерительном резисторе R_M сигнал напряжения поступает на усилитель со стабилизацией нуля, имеющий фиксированный коэффициент усиления ($K_U = 4$). Тем самым реализуется выход с низким импедансом. Типовое значение приведенного к выходу напряжения смещения усилителя равно 100 мкВ (среднеквадратичное значение).

Чтобы ИС можно было использовать в компенсационных датчиках разной топологии, т. е. с разными вторичными обмотками и воздушными зазорами (полными или частичными), предусмотрена возможность задания различных значений постоянной времени интегратора и частоты компенсации полюсов нулями на заводе компании LEM.

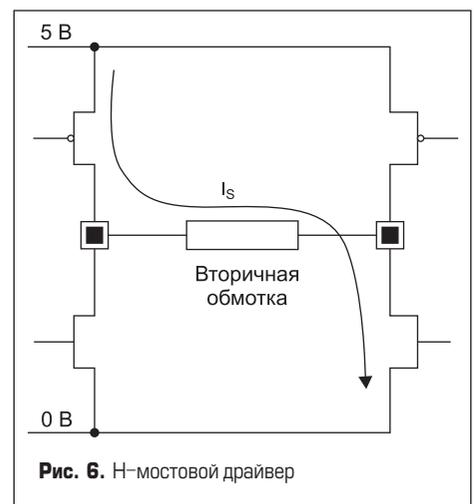


Рис. 6. H-мостовой драйвер

Программировать специализированную ИС могут заводские специалисты LEM и/или конечный пользователь с помощью плавких перемычек. (Разумеется, плавкие перемычки обеспечивают лишь однократное программирование.) Оптимальные настройки определяются в режиме связи с микросхемой по стандартному интерфейсу шины UART, а затем сохраняются путем пережигания соответствующих перемычек.

По сравнению со специализированной ИС прошлого поколения на базе элементов Холла, которая применялась в компенсационных датчиках тока серии LTSR, появившихся в 2003 г., ИС нового поколения приобрели и новую функциональность:

- Н-мост с максимальным размахом напряжения ± 5 В, питающий вторичную обмотку, а максимальный размах выходного напряжения ИС старого образца составлял всего лишь $\pm 2,1$ В.
- Ток питания вторичной обмотки достигает 150 мА, а ИС старого образца вырабатывала ток не более 40 мА.
- Высокоточный выходной дифференциальный усилитель (класса АВ) со сверхмалым напряжением смещения (среднеквадратичное значение 100 мкВ) и высоким коэффициентом подавления синфазного напряжения (не менее 70 дБ), а в ИС старого образца смещение выходного усилителя корректировалось с шагом 8 мВ.
- Настройка заводскими специалистами LEM или конечным пользователем по однопроводному цифровому интерфейсу, что не предусматривалось в ИС старого образца.
- Калибровка заводскими специалистами LEM по однопроводному цифровому интерфейсу: единственно необходимая операция — коррекция коэффициента усиления с шагом 1%. Это позволяет LEM избежать применения прецизионного измерительного резистора R_M , хотя его температурный дрейф вносит свой вклад в погрешность чувствительности. Не предусматривалось в ИС старого образца.
- Обнаружение перегрузки по току на дополнительном выходе. Порог срабатывания задается в диапазоне от I_{PN} до $5 \times I_{PN}$ с шагом $0,25 \times I_{PN}$. Не предусматривается в ИС старого образца.
- Встроенная функция размагничивания с возможностью автоматически производить размагничивание при пуске для устранения начального смещения, обусловленного намагничиванием. Не предусматривается в ИС старого образца.
- Напряжение питания $U_C = 5$ В $\pm 5\%$ или 3,3 В $\pm 5\%$. ИС старого образца могла питаться только напряжением +5 В.
- Идентификатор конкретного экземпляра микросхемы: номер полупроводниковой пластины, XY-координаты на пластине для обеспечения прослеживаемости, доступ к соответствующему протоколу данных. Не предусматривался в ИС старого образца.
- Возможность ввода и вывода опорного напряжения. Выходное опорное напряжение может равняться 0,5, 1,65 или 2,5 В,

а диапазон входных опорных напряжений 0,5–2,75 В. Погрешность выходного опорного напряжения ± 5 мВ при температуре 25 °С. В ИС старого образца предусматривалось только одно значение выходного опорного напряжения (2,5 В со смещением ± 25 мВ), а диапазон входных опорных напряжений составлял 1,9–2,7 В.

- Установка постоянной времени интегратора и частоты компенсации полюсов нулями на заводе компании LEM с помощью плавких перемычек. В ИС старого образца значения этих параметров устанавливались с помощью внешних конденсатора и резистора.

Характеристики смещения и соответствующий патент компании LEM

В сравнении с ИС предыдущего поколения уменьшены смещение и его температурный дрейф. У датчиков с токовым выходом смещение, приведенное к входу, не превышает 30 мкТл с температурным дрейфом менее 0,3 мкТл/°С. У датчиков с выходным сигналом в виде напряжения к этому смещению добавляется равное 0,1 мВ смещение усилителя, не входящего в петлю обратной связи: Это вчетверо меньше, чем у ИС старого образца. На рис. 7 показан замкнутый контур обратной связи на постоянном токе с расчетом составляющих смещения до коррекции.

Смещение элемента Холла очень мало (порядка нескольких мкТл) благодаря при-

менению топологии собственной разработки, защищенной патентом компании LEM [2]. Новизна состоит в разделении элементов Холла на несколько блоков, распределенных по площади кристалла и легко соединяемых между собой.

Это сделано для повышения эффективности «вращения» тока.

Такое разделение позволяет разделить смещение элементов Холла на более мелкие уровни, которые эффективнее компенсируются методом «вращения».

В линейной системе «вращение» полностью компенсировало бы смещение, но элементы Холла нельзя считать линейными, поэтому некоторое остаточное смещение сохраняется. Нелинейность возрастает с ростом напряжения смещения элемента. При низком напряжении смещения элемента Холла минимизируется начальное смещение и его температурный дрейф, но при этом снижается отношение сигнал-шум. Чтобы восстановить отношение сигнал-шум, используется матрица из нескольких элементов Холла с пониженным напряжением смещения.

Трудность состояла в том, чтобы интегрировать на кристалле матрицу элементов Холла без ограничений по расположению, сохранив при этом геометрическую симметрию. Использование специальной топологии дифференциально-разностного усилителя также внесло большой вклад в достижение успеха.

Выходной сигнал этой схемы пропорционален сумме дифференциальных входных сигналов.

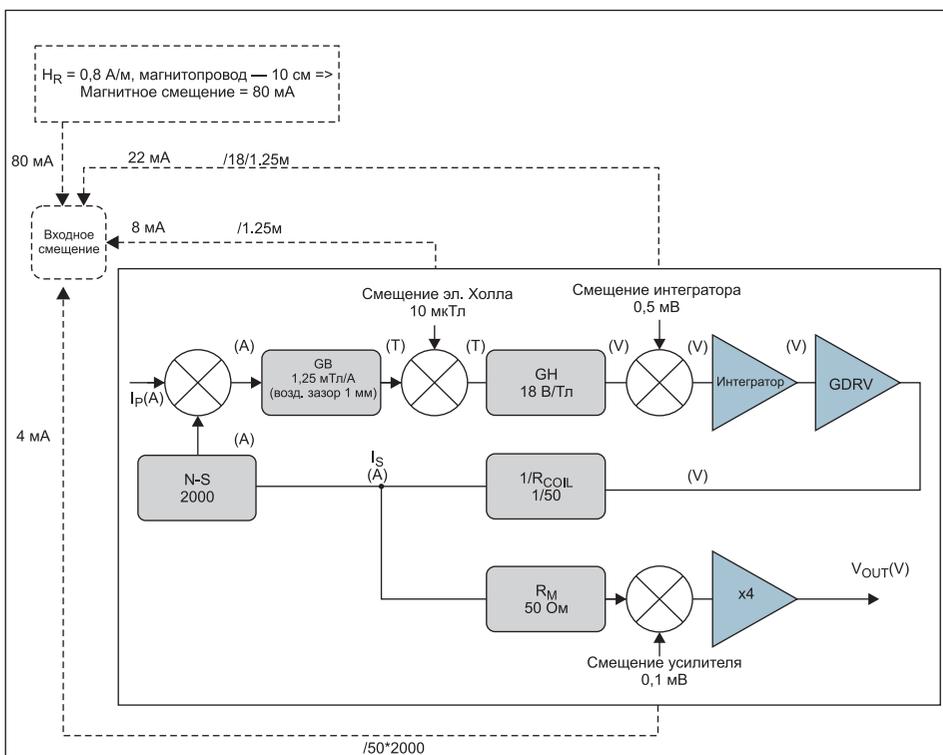


Рис. 7. Модель замкнутого контура обратной связи на постоянном токе: GB — магнитная чувствительность, обусловленная воздушным зазором, она обратно пропорциональна ширине зазора; GH — входное усиление, включающее в себя чувствительность элемента Холла и коэффициент усиления дифференциально-разностного усилителя; N-S — число витков вторичной обмотки; Rcoil — активное сопротивление вторичной обмотки; GDRV — фиксированный коэффициент усиления выходного драйвера (равен 3)

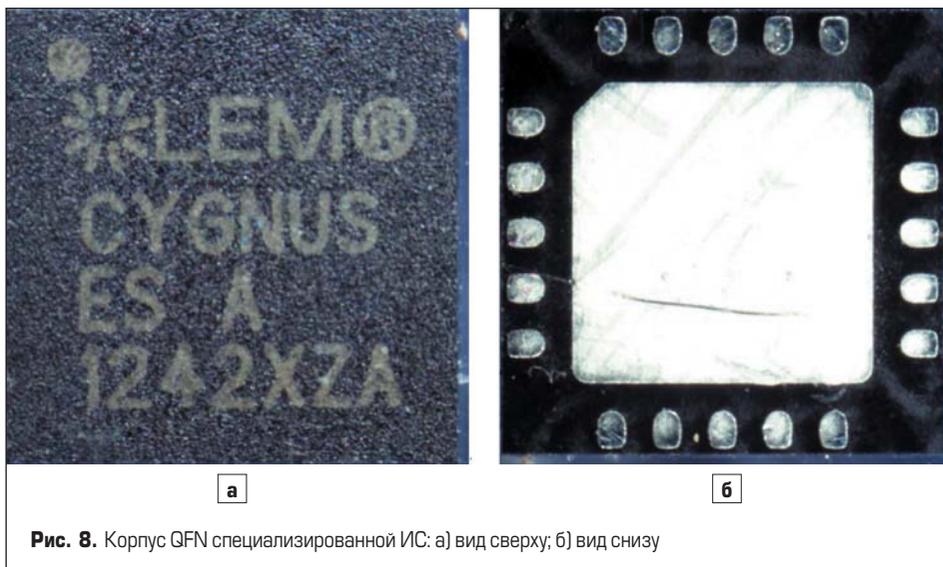


Рис. 8. Корпус QFN специализированной ИС: а) вид сверху; б) вид снизу

Полное описание этого метода дано в работе [3]. Коррекция общего тока смещения вторичной цепи задается на заводе-изготовителе и сохраняется в микросхеме путем пережигания плавких перемычек. Коррекции смещения выходного усилителя не требуется.

Корпус

Специализированная ИС выпускается в тонком корпусе QFN размерами 4×4 мм. Толщина корпуса составляет 0,45 мм (в худшем случае — 0,5 мм), что позволяет уменьшить смещение и повысить отношение сигнал-шум за счет тонкого воздушного зазора. На рис. 8 показан вид сверху и снизу корпуса специализированной ИС.

В третьей строке указаны уровень аттестации (ES — опытный образец, IND — для промышленного применения, AUT — для применения в автомобилестроении) и фирменное обозна-

чение версии (A). В четвертой строке приведен код даты в формате YYWWZZ: YY — год, WW — неделя, I — код завода, ZZ — зарезервировано для сборочной линии.

Уровень качества

Программа квалификационных испытаний специализированной ИС включает в себя все испытания, описанные в автомобильном стандарте АЕС Q100: визуальный контроль, испытание на устойчивость к электростатическим разрядам, испытание на эффект защелкивания, термоциклирование и ускоренные ресурсные испытания (1000 ч при температуре 125 °С и относительной влажности 85%).

Заключение

Представлена новая специализированная ИС для компенсационных датчиков

тока с улучшенными характеристиками, в частности, начальным смещением и температурным дрейфом. Дополнительная функциональность новой ИС включает размагничивание и обнаружение перегрузки по току с выбором порога срабатывания.

Для дальнейшего улучшения характеристик необходимо было бы вести речь о применении более дорогостоящих технологий, например феррозондовых датчиков, которые имеют более высокое отношение сигнал-шум, чем элементы Холла, которые использованы в описанной здесь специализированной ИС.

Новая ИС впервые была применена в новой серии датчиков тока LF xx10 с конкретной целью — существенно повысить уровень точности в рабочем диапазоне температур, чему способствует очень низкий дрейф смещения. Эта серия компенсационных датчиков тока предназначена для использования в силовой электронике с высокими требованиями к рабочим характеристикам, она включает в себя модели на номинальный ток 200, 300, 500, 1000 и 2000 А.

Литература

1. Popovic R.S., Hall Effect Devices; Institute of Physics Publishing, 2004. ISBN 0 7503 0855 9
2. Патент WO/2012/001662, Система датчиков Холла, Liaisons Electroniques-Mecaniques Lem S.A., дата публикации: 5 января 2012 г. <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2012001662>
3. Kejik P., Bourdelle, P.F., Reymond S., Salvi F., Farine P.A. Offset Compensation Based on Distributed Hall Cell Architecture / Magnetics // IEEE Transactions on V. 49, №. 1, pp. 105,108, 2013, Jan. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6392384>