

# Усовершенствование феррозондовой технологии

## ПОВЫШАЕТ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА

**Применение феррозондовых технологий в датчиках, предназначенных для точного измерения тока, хорошо известно. Для повышения точности до уровня, превышающего возможности существующих сенсоров, нужны новые идеи. В статье приведен краткий обзор феррозондовых измерителей тока. Показано, как усовершенствование существующей архитектуры датчиков позволило разработать новое семейство сенсоров с улучшенными параметрами.**

Мишель Гиларди  
(Michel Ghilardi)

### Введение в теорию феррозондовых токовых датчиков

Феррозондовые токовые преобразователи, описанные в статье, являются устройствами компенсационного типа, в которых магнитное поле, создаваемое в магнитной цепи измеряемым, или первичным, током  $I_p$ , полностью компенсируется вторичным или компенсационным, током  $I_{comp}$ , проходящим через катушку с обмоткой  $N_{comp}$ , намотанную вокруг той же магнитной цепи. В общем случае, когда первичная обмотка с током имеет  $N_p$  витков,  $I_p$  определяется как:

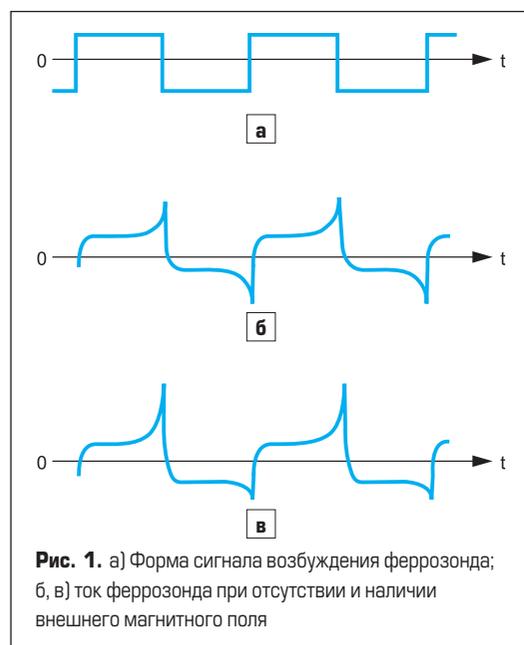
$$I_p = I_{comp} \times N_{comp} / N_p.$$

Условие «нулевого уровня поля» фиксируется феррозондом, состоящим из катушки, намотанной вокруг ферромагнитного сердечника, который насыщается в присутствии магнитного поля. Индуктивность катушки при насыщении уменьшается. Когда на катушку феррозонда подается симметричное прямоугольное напряжение, при его насыщении скорость изменения тока будет возрастать, однако форма токового сигнала останется симметричной. Если же дополнительно прикладывается магнитное поле, создаваемое первичным током, то в этом случае форма сигнала станет асимметричной.

Этот процесс иллюстрирует рис. 1: кривая (а) — это прямоугольное приложенное напряжение, содержащее только нечетные гармоники основной частоты; кривая (б) — симметричная форма тока, когда внешнее магнитное поле равно нулю (здесь также содержатся только нечетные гармоники); кривая (в) — асимметричный сигнал, который наблюдается в случае, когда внешнее поле не равно нулю (он содержит четные гармоники и постоянную составляющую).

На рис. 2 показан принцип действия преобразователя тока, использующего это явление. Прямоугольное напряжение подается на феррозонд с H-моста, его ток преобразуется в напряжение с помощью сопротивления  $R$ , а его симметрия измеряется путем обработки сигнала, состоящей в обнаружении второй гармоники. Контур замыкается выработкой компенсационного тока  $I_{comp}$  с помощью усилителя класса АВ таким образом, чтобы вторая гармоника была равна нулю. Ток  $I_{comp}$  преобразуется в напряжение с помощью резистора  $R_m$ .

Следует отметить, что феррозондовая система работает на постоянном токе и низких частотах первичного тока; на более высоких частотах работает



**Рис. 1.** а) Форма сигнала возбуждения феррозонда; б, в) ток феррозонда при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля

эффект трансформатора тока, а также другие технологии, описанные далее.

**Преимущества и ограничения феррозондовых преобразователей**

Феррозонд — пассивный элемент, управляемый симметрично; вместе с использованием второй гармоники для детектирования нулевого поля это обеспечивает системе минимальные смещение и, что более важно, низкий дрейф смещения, принципиально ограниченный электроникой цепи обратной связи. Коэффициент трансформации  $N_{comp}/N_p$  точно известен, поэтому датчик имеет очень высокую точность и стабильность. Он работает в нулевом магнитном поле при условии, что коэффициент усиления контура регулирования достаточно высок, что дает системе отличную линейность. Трансформаторный эффект обеспечивает хороший отклик на высоких частотах. В отличие от датчиков на основе эффекта Холла, здесь нет чувствительного элемента с высоким сопротивлением, поэтому уровень белого шума низкий.

Однако существуют и некоторые ограничения. Управляющее напряжение, которое возбуждает феррозонд, может проникать во вторичный ток и добавлять нежелательный сигнал или пульсации на частоте возбуждения. Проблема может быть решена путем возбуждения второго феррозонда напряжением, находящимся в противофазе с сигналом возбуждения феррозонда, используемого в контуре измерения, однако эффективность этого метода ограничена согласованностью феррозондов.

В общем случае контур феррозонда не будет работать вплоть до той частоты, при которой проявляется трансформаторный эффект. Этот частотный «пробел» должен быть заполнен, например, за счет вспомогательной катушки, выходное напряжение которой пропорционально скорости изменения первичного тока; после интегрирования этот сигнал суммируется с выходным напряжением детектора второй гармоники и используется для управления вторичным током. На рис. 3 показана более полная схема преобразователя (рис. 2), содержащая компоненты, предназначенные для преодоления двух описанных ограничений.

Обратите внимание на то, что электронная схема в контуре управления довольно сложная, и если ее реализовать в аналоговом виде, то появится множество блоков, способных создавать смещение, шумы от источников питания и так далее. В некоторых преобразователях эта электроника физически отделена от магнитных компонентов, являющихся ядром системы (пример показан на рис. 4).

В определенных ситуациях, например, когда  $I_p$  превышает пределы диапазона измерения, феррозонд всегда будет насыщенным, что создает состояние «ошибочного нуля второй гармоники». При этом контур, генерирующий  $I_{comp}$ , не работает, поскольку изменение  $I_{comp}$  не приводит к изменению измеренного уровня второй гармоники. Это состояние должно детектироваться и корректироваться.

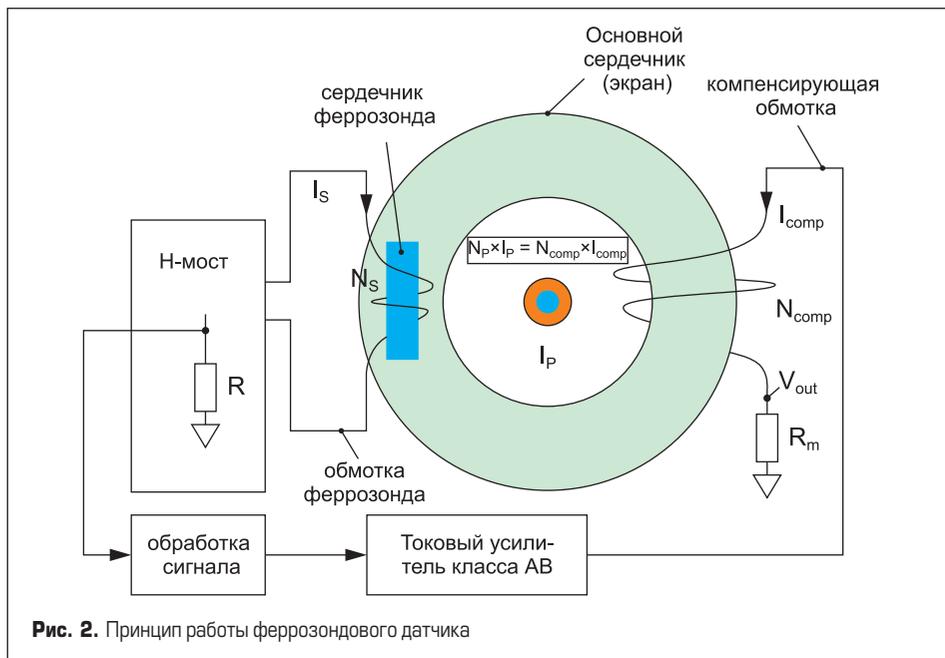


Рис. 2. Принцип работы феррозондового датчика

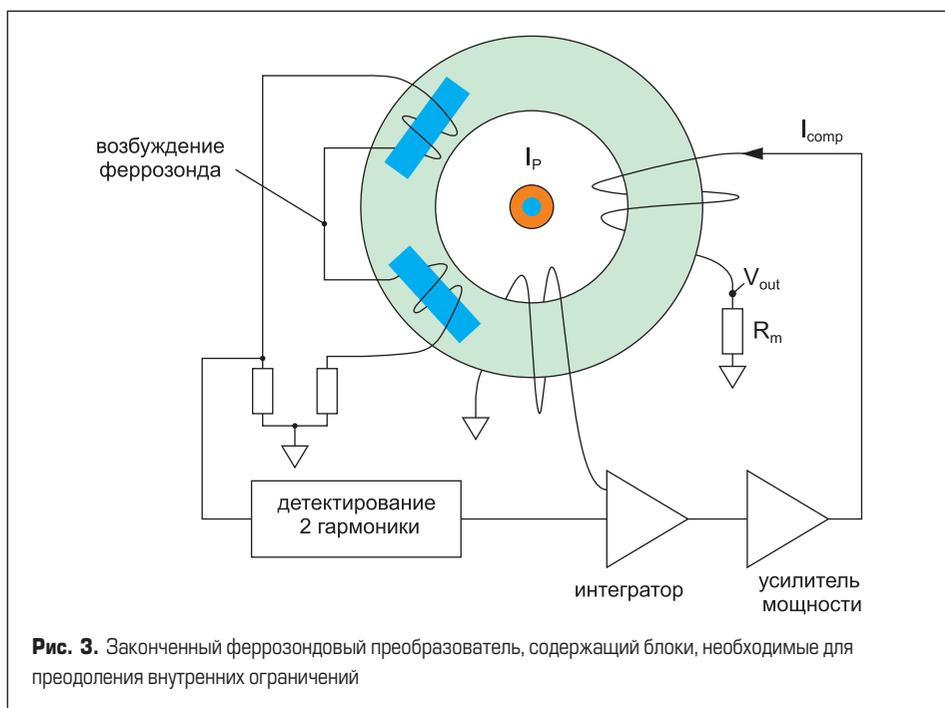


Рис. 3. Законченный феррозондовый преобразователь, содержащий блоки, необходимые для преодоления внутренних ограничений



Рис. 4. Датчик на 2000 А (ITZ 2000) предыдущего поколения, состоящий из двух частей: 1 — измерительная головка; 2 — управляющая электроника

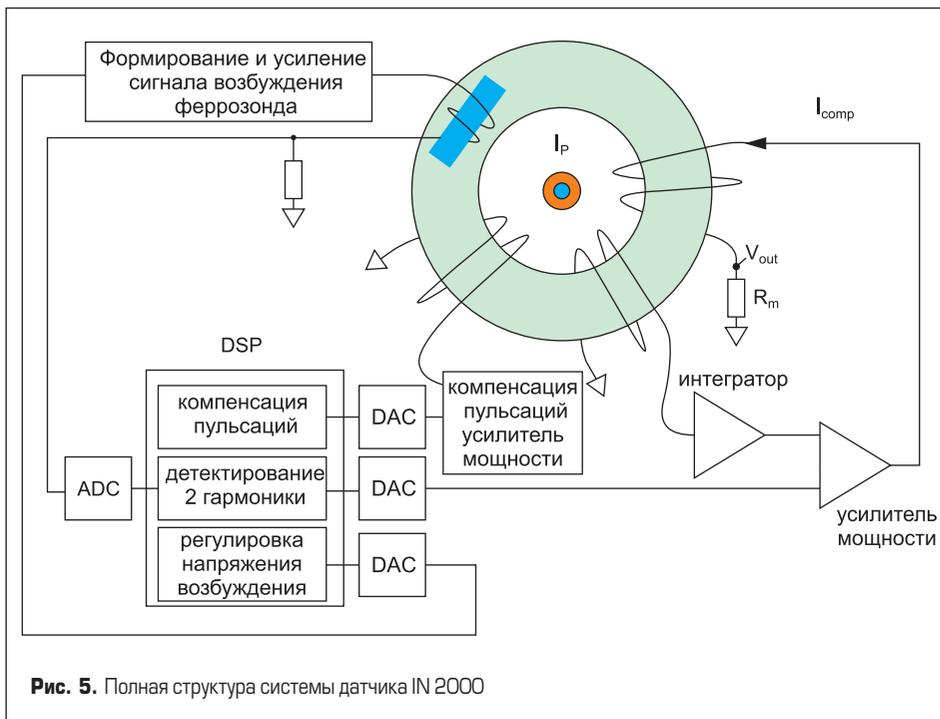


Рис. 5. Полная структура системы датчика IN 2000

**Инновации улучшают параметры**

В новом датчике тока IN 2000 от компании LEM улучшения достигнуты благодаря большему уровню интеграции, выполнению максимума обработки сигнала в цифровом виде и новому подходу к способу подавления пульсаций на частоте возбуждения феррозонда. Выгоды от объединения этих трех инноваций оказываются больше, чем сумма преимуществ каждой из них.

**Интеграция и цифровая обработка сигнала**

Одним из ключевых элементов сенсора IN 2000 является использование высокопроизводительного цифрового сигнального процессора (DSP) в контуре обратной связи. Если сигнал обрабатывается в цифровой форме, то после АЦП он имеет полный иммуни-

тет к воздействию изменений температуры и помех и колебаниям напряжения питания. В частности, это позволяет снизить смещение выходного сигнала и его дрейф. Сигнальный процессор имеет flash-память, что дает возможность хранить некоторые параметры калибровки, значения которых могут быть подобраны для каждого отдельного датчика. Эти возможности обеспечиваются без какого-либо увеличения размера электронного блока.

**Архитектура**

DSP используется двумя способами, чтобы уменьшить помехи или пульсации от сигнала возбуждения феррозонда на фиксированной частоте 16 кГц. Вместо простого переключения напряжения управления между положительным и отрицательным уровнем, как показано на рис. 1а, форма сигнала формируется таким образом, чтобы минимизировать высоко-

частотные гармоники. Оставшиеся помехи устраняются с помощью «компенсирующей пульсации катушки», амплитуда и фаза сигнала которой корректируются в процессе калибровки каждого датчика. Необходимая компенсация пульсаций поддерживается при всех условиях работы с помощью локального контура, который поддерживает сигнал источника пульсаций (возбуждение феррозонда) неизменным, поэтому компенсирующий сигнал всегда оказывается эффективным. Некоторые датчики предыдущих поколений позволяют варьировать частоту возбуждения феррозонда для того, чтобы амплитуда его тока оставалась постоянной. Однако изменения частоты в системе создают непредсказуемые эффекты, и использование фиксированной частоты в IN 2000 является более предпочтительным.

**Результаты модификации**

На рис. 5 показана полная структура IN 2000, включающая новые усовершенствования. Их внедрение в результате обеспечивает очень высокую точность и низкий уровень шумов датчика, и все это в расширенном диапазоне температур. После калибровки пиковое значение пульсаций составляет менее 50 ppm относительно полного выходного сигнала преобразователя в диапазоне рабочих температур -40...+85 °С.

В статье представлен датчик на 2000 А, являющийся представителем семейства, охватывающего целый ряд датчиков на разные токи. На рис. 6 показано сравнение пульсаций с частотой возбуждения феррозонда на выходе преобразователя. Две представленные эпюры демонстрируют разницу между IN 2000 и 2000-А датчиком предыдущего поколения: у IN 2000 пульсации находятся на уровне тепловых шумов.

Два условия могут привести к постоянному насыщению феррозонда: ненулевой первичный ток, когда на датчик подается питание, и когда первичный ток превышает рабочий диапазон более чем на 10%. Если обнаруживается подобная ситуация перегрузки,  $I_{comp}$  постоянно колеблется между крайними значениями диапазона измерения. Таким образом, если  $I_p$  снова оказывается в разрешенном диапазоне, феррозонд выходит из насыщения, и нормально работающий контур обратной связи устанавливает в нем нулевое магнитное поле. Насыщение феррозонда детектируется при увеличении его тока.

Как и для случая перегрузки по току, описанного выше, датчик IN 2000 имеет программно реализованный режим самозащиты, который проверяет внешние и внутренние питающие напряжения. При обнаружении любой неисправности IN 2000 меняет статус на специальном выходе сигнального разъема, т. о. пользователь узнает, что необходимо обеспечить условия, при которых точность измерений гарантируется.

Тестовая обмотка с 200 витками позволяет проверить функционирование датчика при токе 1 А без вмешательства в работу системы, где доступ к нему затруднен. Важной особенностью IN 2000 является его способность ра-

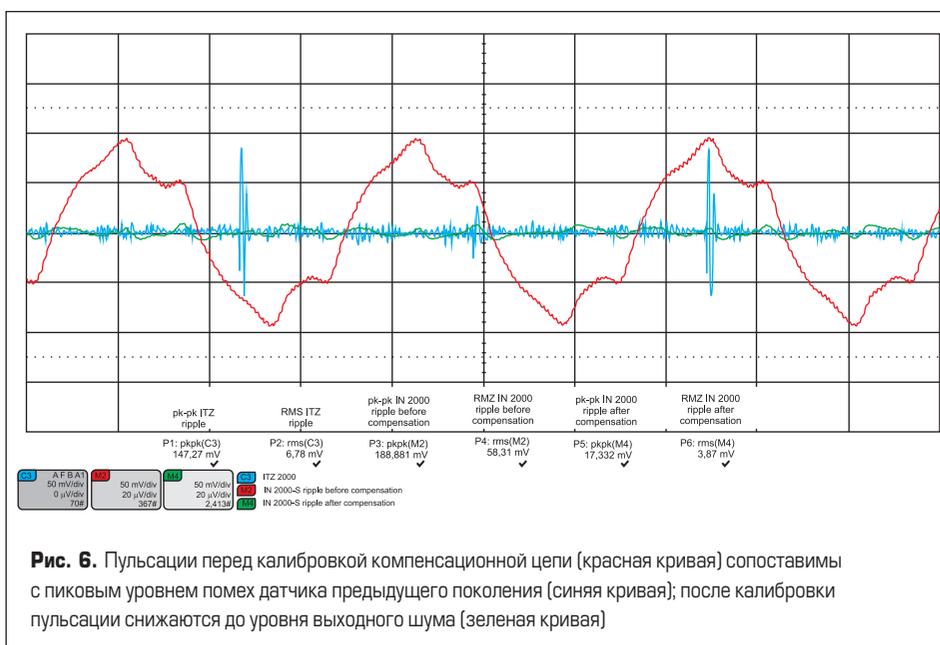


Рис. 6. Пульсации перед калибровкой компенсационной цепи (красная кривая) сопоставимы с пиковым уровнем помех датчика предыдущего поколения (синяя кривая); после калибровки пульсации снижаются до уровня выходного шума (зеленая кривая)

ботать в широком диапазоне температур. Для исключения возникновения зон локального перегрева было выполнено тепловое моделирование датчика (рис. 7).

Законченная конструкция преобразователя приведена на рис. 8. Металлический корпус обеспечивает лучшую защиту от внешних источников помех. Для улучшения электромагнитной совместимости (EMC) феррозонд размещен внутри первичной магнитной цепи.

**Основные параметры нового датчика**

Значения основных характеристик датчика IN 2000 показаны в таблице.

Масштабная характеристика датчиков IN 2000 была выполнена во всем диапазоне температур. В качестве примера на рис. 9 показана точность выборки преобразователей при -40...+85 °С.

**Заключение**

Проверка характеристик электронной аппаратуры и оборудования производится в сертифицированных лабораториях, использующих высокопроизводительные испытательные стенды, насыщенные высокотехнологичными измерительными приборами, включающими прецизионные датчики тока. Они должны обеспечивать высокую точность во всем диапазоне рабочих температур тестируемого оборудования, например автомобильной электронной техники.

Точность, необходимая для испытательного оборудования, зачастую нужна и в традиционных промышленных применениях, требования к которым все более возрастают в таких сложных системах, как медицинское оборудование (например, МРТ, протонная терапия и т. д.), прецизионные контроллеры привода электродвигателя и средства измерения.

Датчик IN 2000 знаменует новый шаг в улучшении параметров измерения, которые могут быть получены от феррозондовых датчиков. Его высокая точность и низкий уровень шумов, сохраняемые в широком диапазоне температур, а также компактные размеры позволяют расширить спектр применений, где выбор такого измерителя тока является оптимальным.

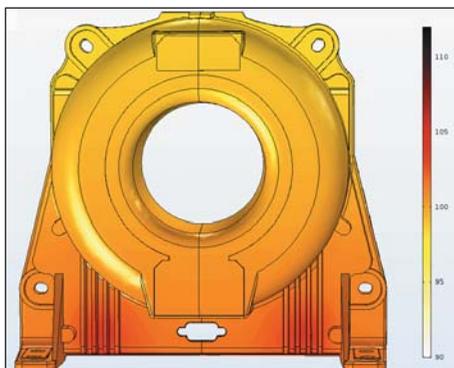


Рис. 7. Тепловое моделирование при температуре окружающей среды +85 °С, первичный ток – 2000 А DC



Рис. 8. Датчик IN 2000

Таблица. Основные характеристики. Все значения, данные в ppm, относятся к полному диапазону измеряемых токов

Параметр	Макс. значение при -40...+85 °С
Напряжение питания $U_c$ , В	±15, ±5%
Номинальный диапазон измеряемых токов $I_{PN}$ , А rms	±2000 (IN 2000); AC и DC
Диапазон измеряемых токов $I_{PM}$ , А	±3000
Кол-во витков вторичной обмотки $N_{comp}$	2000
Выходной шум RMS $I_{no}$ до 10 Гц/10 кГц/160 кГц, ppm	0,1/4/10
Пиковый уровень пульсаций $I_{pp}$ на выходе на частоте 16 кГц, ppm	50
Смещение выходного сигнала $I_{OE}$ , ppm	±10
Температурный коэффициент $I_{OE}$ (TCI <sub>OE</sub> ), ppm/K	0,1
Нелинейность в полном диапазоне измерения $\epsilon_L$ , ppm	<3
Временной отклик $t_r$ на 90% of $I_{PN}$ , мкс	<1
Диапазон частот (-3 дБ) BW, кГц	140

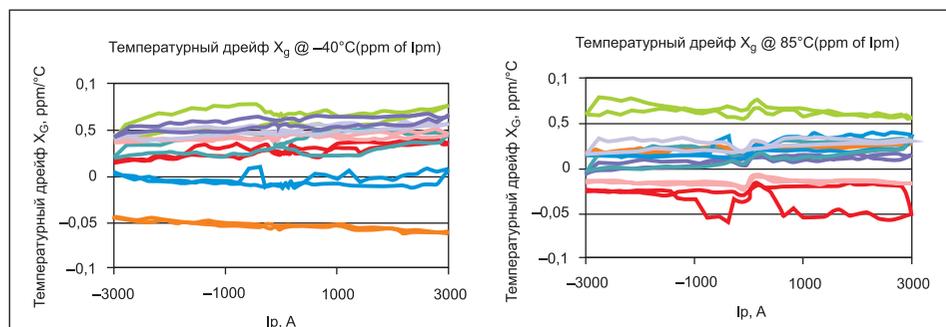


Рис. 9. Характеристика температурного дрейфа IN 2000 при +25 °С, а также на нижнем и верхнем пределах температур