

# Датчики тока компенсационного типа

Эрик Ланге (Erik Lange)

Перевод:  
Владимир Рентюк

Без измерения тока не обходится практически ни одно изделие силовой электроники. Для этой цели используются выполненные на базе самых разнообразных технологий специальные датчики или преобразователи тока, однако две из них являются основными и наиболее распространенными. Это датчики компенсационного типа с элементом Холла (в англоязычной терминологии — Closed Loop Hall Effect) и индукционные датчики компенсационного типа (в англоязычной терминологии — Closed Loop Flux Gate). Технология компенсационного типа (в англоязычной терминологии — Closed Loop Technology) обладает рядом преимуществ и широко применяется разработчиками силовой электроники. Однако у данной технологии есть несколько аспектов, и если их не принимать во внимание, это может привести не только к неожиданным проблемам, но даже к отказам конечного оборудования. В настоящей статье рассматриваются характерные особенности технологии компенсационного типа, которые необходимо учитывать при ее использовании.

Датчики тока в том смысле, что они не оказывают какого-либо активного влияния на измеряемый ток, можно считать пассивными устройствами, но в действительности для их функционирования необходимо отдельное питание. Типичный ток потребления составляет порядка 30 мА практически вне зависимости от питающего напряжения. Причем большинство преобразователей требует двуполярного источника напряжения (как правило,  $\pm 15$  В). Тем не менее в последнее время наблюдается тенденция к использованию преобразователей и с однополярным питающим напряжением. К тому же преобразователи компенсационного типа потребляют дополнительный (кроме тока потребления в режиме отсутствия входного сигнала) ток от источника питания для обеспечения вторичного, выходного тока при наличии первичного тока на входе.

## Две основные особенности датчиков

В отличие от трансформаторов тока датчики тока могут измерять как постоянный, так и переменный токи. Собственно, для того они и предназначены. Это и есть одна из двух особенностей, которыми обладают такие датчики в отличие от других измерителей тока. Синусоидальный переменный ток может быть измерен с применением обычного трансформатора

тока. Но если измеряемый ток имеет периоды без изменения тока во времени  $di/dt$ , то в таком случае необходим именно датчик тока.

Гальваническая изоляция — вторая особенность, которая должна учитываться при выборе датчика для измерения тока в конкретном применении. Первичная и вторичная цепи датчиков электрически изолированы друг от друга. Это делается потому, что первичная цепь имеет высокий потенциал (480 В), в то время как вторичная цепь использует значительно более низкое напряжение ( $\pm 15$  или +5 В). Гальваническая изоляция реализуется с помощью магнитных сердечников. Ток в первичной обмотке наводит в магнетике магнитное поле, которое концентрируется магнитной цепью. Магнитный элемент измеряет магнитную индукцию поля (В) и преобразует ее в форму напряжения или порогового тока. Данные о величине магнитной индукции, преобразованные в напряжение или ток на выходе устройства, пропорциональны силе тока в первичной цепи.

Первыми разработанными датчиками тока были так называемые датчики прямого усиления с элементом Холла (в англоязычной терминологии — Open Loop Hall Effect). Устройство состоит из трех частей: магнитного сердечника, элемента Холла и усилителя. Выход такого преобразователя — напряжение, пропорциональное силе тока в первичной силовой цепи.

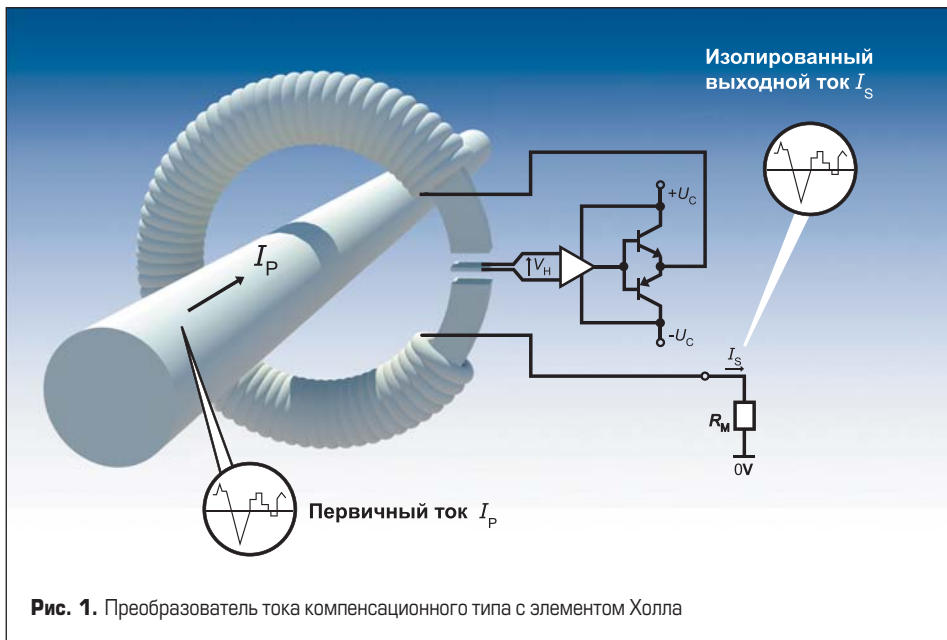
## Датчики тока компенсационного типа с элементом Холла

Следующим шагом в развитии технологии преобразователей являются датчики тока компенсационного типа с элементом Холла (рис. 1). Этот тип датчиков основан на базовой концепции датчика прямого усиления с дополнением его вторичной обмоткой, подключенной к выходу преобразователя. Вторичная обмотка намотана на магнитном сердечнике, а протекающий по ней вторичный ток формирует в магнитной цепи магнитное поле, противоположное полю, созданному током в первичной цепи. Это позволяет достичь нулевого магнитного потока в сердечнике. Несомненные преимущества технологии компенсационного типа — практическое отсутствие вихревых токов и более широкая полоса пропускания. Выход такого датчика может быть представлен в виде источника тока, ток которого пропорционален току в первичной цепи,

поделенному на количество витков вторичной обмотки. То, что коэффициент усиления датчика определяется числом витков вторичной обмотки, делает его практически независимым от изменений температуры. В спецификациях (Data Sheet) на датчики компенсационного типа температурная зависимость коэффициента усиления не приводится, поскольку, повторимся, в датчиках компенсационного типа влияние температуры на коэффициент усиления отсутствует. То, что эти устройства имеют на выходе ток, а не напряжение, также является преимуществом, поскольку подобный вариант их реализации менее восприимчив к источникам помех, способных возникнуть в конкретном приложении. Выходной ток такого датчика обычно пропускается через нагрузочный резистор. Ток, проходящий через нагрузочный резистор, создает на нем падение напряжения, которое может быть измерено аналого-цифровым преобразователем или оценено при помощи компаратора.

**Компенсационные датчики индукционного типа**

В компенсационных датчиках индукционного типа (в англоязычной терминологии — Closed Loop Flux Gate) элемент Холла заменен индукционным детектором магнитного потока (Flux Gate detector) (рис. 2). Такой детектор представляет собой сердечник из магнитного материала, помещенный в зазор магнитной цепи. Сердечник индукционного детектора имеет обмотку, которая возбуждается напряжением прямоугольной формы, доводящим сердечник до насыщения в каждом из полупериодов напряжения. Наведенный в обмотке детектора ток, чья величина в каждом полупериоде зависит от момента входа сердечника в насыщение, сравнивается с неким пороговым уровнем. При достижении порога происходит изменение скважности импульсов прямоугольного напряжения. Момент входа сердечника детектора в насыщение, а значит,

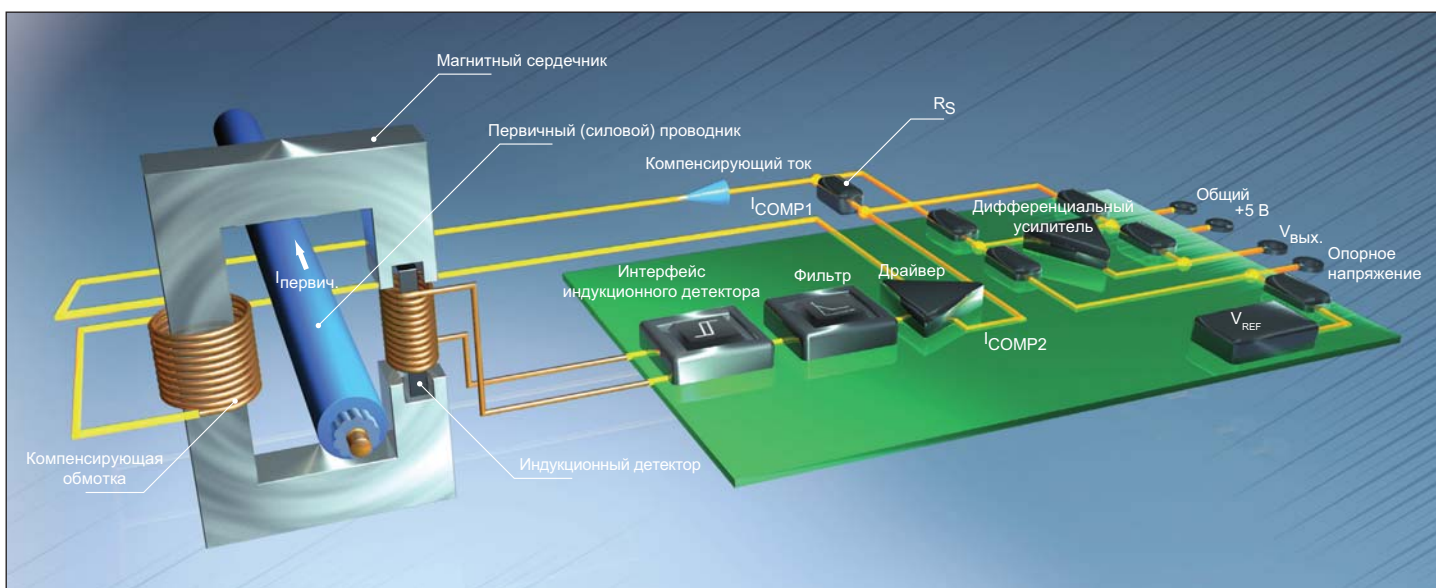


и скважность прямоугольного напряжения пропорциональны величине тока в первичной цепи. По своей природе технология с индукционным детектором является цифровой и содержит внутренний генератор тактовых импульсов, который сам может быть источником помех с частотой, пропорциональной тактовой частоте. Однако частота этих помех значительно выше рабочей полосы пропускания датчика. Полный состав подобной системы выглядит следующим образом: магнитная система, индукционный детектор с обмоткой, специализированная интегральная микросхема и вторичная обмотка. Нагрузочный резистор может быть встроенным, тогда на выходе датчика присутствует сигнал в виде напряжения. В противном случае выход такого датчика — токовый. Есть и другие технологии реализации датчиков с детектором индукционного типа. Это касается различных вариантов возбуждения и схем детектирования, но в целом все решения схожи между собой.

Датчики компенсационного типа разработаны для долговременного измерения тока, не превышающего номинального, заявленного в спецификации на конкретный тип датчика. Измеряемый ток обычно называют первичным. Выходной ток датчика именуют вторичным током. Датчики компенсационного типа могут измерить и более высокие токи, чем номинальный (диапазон измерения), но этот более высокий измеряемый ток допустим только лишь в течение короткого промежутка времени (секунд, миллисекунд или микросекунд).

Преимущества того, что датчики компенсационного типа имеют токовый выход заключаются еще и в том, что при этом достигается значительно большая помехоустойчивость и более высокая точность измерения.

Назначение датчика тока — это, собственно, измерение тока. Но до какой степени такое измерение является достоверным? Любые датчики не идеальные устройства и имеют свою величину погрешности. Как ни странно, коэффи-



циент усиления в таких датчиках определяется их механическими параметрами, а именно: насколько точно выполнена намотка вторичной цепи на намоточном станке. Линейность датчика в свою очередь зависит от характеристик материала, из которого изготовлен магнитный сердечник. А начальное смещение на выходе датчика — от остаточной намагниченности магнитного сердечника. Ранее было выявлено, что температура не оказывает влияния на усиление датчика, но влияет на начальное смещение его выходного сигнала. Температурный дрейф начального смещения на выходе датчика может оказывать влияние в конкретном применении (например, возникают пульсации выходного сигнала). Здесь преимущества за датчиками индукционного типа. У них минимальное начальное смещение выходного сигнала и более низкий, чем у датчиков на эффекте Холла, температурный дрейф.

### Порядок точности измерения

Один из важных вопросов, который относится ко всем измерительным устройствам: сколько разрядов значения измеряемой величины может быть получено в результате замера? Количество разрядов — это функция точности измерения. Достоверность измерения требует определенной степени точности в точке измерения, чтобы быть уверенным в полученном значении. Отношение 4:1 измеренного значения и ошибки измерения этого значения в точке измерения — необходимый минимум (лучше 10:1). Как узнать, должен ли 100-амперный датчик с погрешностью 1% точно измерить ток в 1 А? Здесь на сцену выступают считанное значение и номинальное значение. Погрешность коэффициента усиления всегда оценивается в процентах от считанного значения тока в первичной цепи. Погрешность линейности измерения всегда оценивается в процентах от номинального тока датчика. Начальное смещение также определяется в процентах от номинального тока датчика. Обычно все три погрешности не складываются. В противном случае это привело бы к совершенно нереалистичной величине суммарной погрешности. Суммарную погрешность в общем случае получают как квадратный корень от суммы их квадратов. Датчик, имеющий погрешность усиления в 1%, нелинейность 0,5% и погрешность из-за начального смещения 0,2%, обладает погрешностью измерения в 1,14%. Фактическая ошибка в амперах зависит от величины считываемого тока в первичной цепи ввиду того, что от него зависит погрешность коэффициента усиления. Так, датчик, рассчитанный на номинальный ток 100 А с указанной выше погрешностью измерения, для считываемого тока в 10 А будет иметь фактическую ошибку в 0,55 А. Это даже лучше, чем 10:1. Но датчик, рассчитанный на номинальный ток в 100 А, с указанной выше погрешностью измерения, для считываемого тока в 1 А будет иметь фактическую ошибку, равную 0,54 А. А такая ошибка (0,54 А) означает отношение измеренного тока к ошибке даже хуже, чем 2:1. Таким образом, ток в 1 А уже не может быть достоверно измерен.

Таким образом, обеспечение измерений с точностью в несколько разрядов является трудной задачей. Большинство датчиков обеспечивает измерение токов ниже, чем номинальный, с точностью одного разряда. Обеспечение измерения с точностью в два разряда — это уже серьезная задача. Лучшие из датчиков компенсационного типа обеспечивают отношение примерно 4:1 при точности измерения в два разряда. Еще лучше, если начальное смещение приведено к нулю (скомпенсировано) при подаче питания на датчик, а температурный дрейф начального смещения минимизирован (для датчиков индукционного типа). Но необходимо помнить, что проблема обеспечения точности измерений не ограничивается точностью измерения тока самим датчиком. Требуется учитывать погрешность номинала и дрейф нагрузочного резистора (1% против 0,1%), а кроме того, еще и погрешность аналого-цифрового преобразователя. Проверка системы с использованием осциллографа с пробником в виде разъемного датчика прямого усиления, имеющим погрешность измерения в 2%, не сравнима с использованием датчика тока, имеющего собственную погрешность в 0,5%.

### Снижение параметров

В спецификациях на датчики указаны их номинальный ток, диапазон рабочих температур и частотный диапазон. Максимальные значения всех трех параметров не могут быть обеспечены одновременно. Входящие в состав датчика усилители имеют свои ограничения. Падение напряжения и, следовательно, мощность распределяется между транзисторами выходного каскада усилителя, вторичной обмоткой и нагрузочным резистором. Меньшее сопротивление нагрузочного резистора увеличивает мощность, рассеиваемую выходным каскадом усилителя, что вызывает его больший нагрев. Слишком большое сопротивление нагрузки приводит к ограничению выходного сигнала датчика. Высокая температура окружающей среды в совокупности с большими измеряемыми токами и малым значением сопротивления нагрузки приводит к большой мощности рассеивания усилителем датчика. Эти факторы должны быть приняты во внимание при разработке схемы включения датчика. В спецификациях обычно приводятся графики, показывающие снижение номинальных параметров датчика с учетом их зависимости от этих факторов. Кроме того, компенсационные датчики не могут полностью компенсировать магнитный поток в сердечнике. Увеличение амплитуды и частоты тока еще больше ухудшает компенсацию магнитного потока. В результате появляются вихревые токи и нагрев сердечника. Из изложенного выше и вытекает потребность учитывать при проектировании неизбежное снижение реальных характеристик датчиков в конкретных условиях их применения.

### Первичный проводник и отверстие датчика

Размещение первичного проводника в отверстии датчика также влияет на точность

измерения. Расположение этого проводника по центру отверстия датчика и полное заполнение внутреннего отверстия датчика первичным проводником приводит к повышению точности измерения. Необходимо иметь в виду, что размещение силового проводника первичной цепи близко к краю отверстия может стать причиной локального насыщения сердечника на больших токах. Но это зависит непосредственно от изготовителя датчика. Магнитные сердечники не могут быть совершенно одинаковыми по своим характеристикам. Одни изготовители проектируют свои датчики с запасом по характеристикам сердечников, другие — не делают запаса по параметрам сердечников, тем самым не оставляя возможности нормального функционирования при ошибке позиционирования первичного проводника.

### Спецификации

Все изготовители датчиков предоставляют спецификации или техпаспорта (Data Sheet) на выпускаемые ими изделия. Однако, к сожалению, у подобных документов до сих пор нет единого стандарта. Поэтому в различных спецификациях есть не только схожие моменты, но и много различий. В некоторых спецификациях, например, приводят диапазон измерений, но не указывают номинальное значение. Хотя постоянная работа датчика на максимальном значении тока, указанном как диапазон измерения, может иметь для устройства фатальные последствия. Для одних изготовителей погрешность измерения может означать комбинацию погрешностей усиления, линейности и начального смещения выходного сигнала, а для других — только погрешность усиления. Некоторые изготовители обеспечивают точность намотки вторичной катушки при производстве  $\pm 3$  витка, некоторые — лишь  $\pm 10$  витков. Результирующие погрешности коэффициента усиления таких датчиков будут, естественно, разными. Частотный диапазон может быть приведен по уровню  $\pm 1$  дБ или по уровню  $\pm 3$  дБ.

### Выводы

Правильно подобранный для конкретного применения датчик тока может иметь срок эксплуатации 25 лет и более. Знание специфических особенностей технологии применяемых датчиков помимо параметров, указанных в спецификации, позволяет проектировать системы измерения тока с лучшими параметрами, более устойчивые к окружающим условиям. Такие характеристики датчиков, как погрешность измерения, зависимость ее от температуры, снижение параметров в условиях работы на предельно допустимых значениях, выбор сопротивления нагрузочного резистора, имеют весьма важное значение. Все изложенное выше указывает на необходимость выбора в качестве партнера исключительно технически осведомленных, надежных и проверенных поставщиков датчиков.