

# О некоторых аспектах применения датчиков — преобразователей тока

Эрик Ланге (Erik Lange)

## Введение

При конструировании изделий с использованием датчиков тока приходится сталкиваться с рядом технических аспектов. Некоторые из них возникают лишь периодически и труднопроизводимы. Если они к тому же затрагивают не слишком популярные разделы электротехники, их порой возводят в ранг необъяснимых феноменов.

Данная статья не претендует на исчерпывающее рассмотрение поднятых в ней вопросов, ее цель — дать полезный обзор некоторых известных явлений и помочь инженерам-конструкторам в их работе. Одни из таких явлений имеют довольно сложную природу, связанную с наложением различных эффектов, другие, на первый взгляд представляющиеся невозможными, могут быть объяснены определенными техническими эффектами.

## Погрешность, связанная с положением первичного проводника

Положение и размер проводника с измеряемым током в апертуре датчика влияют на точность измерения. Чем лучше центрирован проводник и чем большую часть апертуры он заполняет, тем точнее будет измерение.

Если оба условия не соблюдены, величину этой погрешности трудно оценить. Для большинства

датчиков прямого усиления и компенсационного типа вносимая неопределенность не превышает 0,1% от погрешности максимального показания (рис. 1).

## Эффекты перегрузки

В технических характеристиках датчика тока указывают либо номинальный ток, либо номинальный и максимальный токи. Как бы то ни было, есть ситуации, в которых первичный ток может превысить максимальный ток датчика.

Датчики с магнитопроводом рассчитаны на эксплуатацию исключительно или в основном в линейной области кривой намагничивания. При выходе из линейной области в область насыщения в магнитопроводе образуется остаточная намагниченность, проявляющаяся в виде некоторого постоянного смещения на выходе датчика. Величина остаточной намагниченности зависит от материала магнитопровода.

Оценить величину остаточной намагниченности очень трудно. На нее влияют как амплитуда, так и длительность токовой перегрузки в первичном проводнике. Обычно ток перегрузки в 3–10 раз превышает номинальный ток датчика и приводит к образованию постоянного смещения на выходе величиной 0,1–2,5% от номинального выходного тока. По имеющимся данным, датчики компенсационного типа характеризуются меньшей остаточной намагниченностью — 0,1–0,25% после трехкратной перегрузки. Датчики прямого усиления при таких же перегрузках демонстрируют более высокую остаточную намагниченность — 0,5% и выше.

В датчиках, измеряющих переменный ток, эта остаточная намагниченность может со временем уменьшаться в случае переменного первичного тока при прохождении циклов гистерезиса под действием первичного тока. При постоянном токе остаточная намагниченность сохраняется на неизменном уровне.

## Эффекты обратного проводника

Обратный проводник, как и прямой, также создает магнитное поле. Поскольку любая работающая электрическая цепь представляет собой зам-

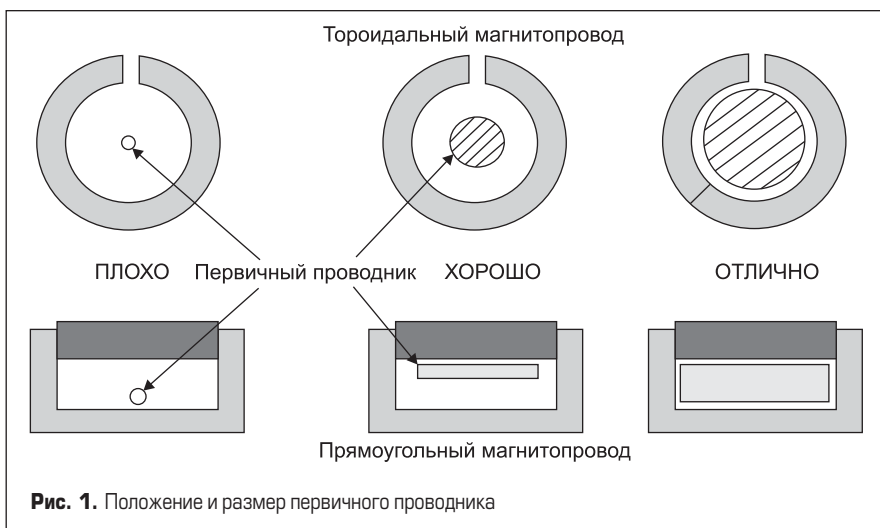


Рис. 1. Положение и размер первичного проводника

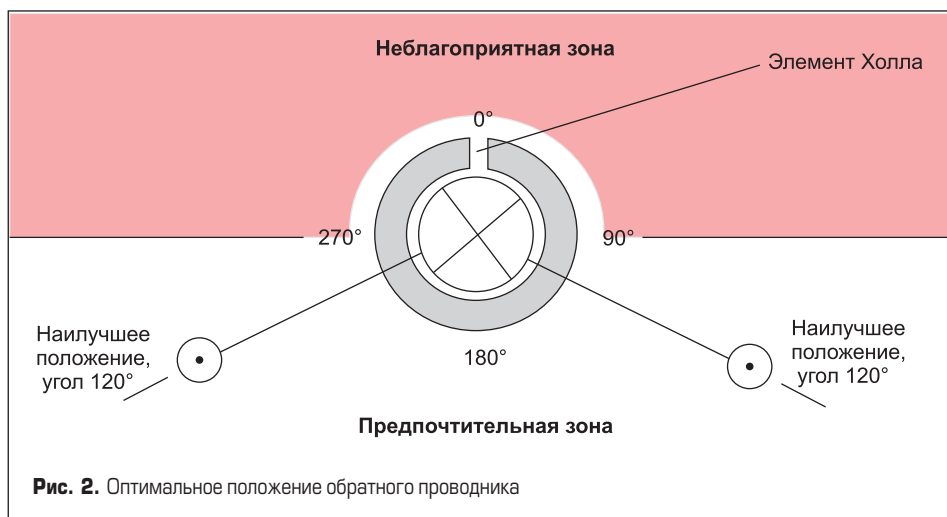
кнутый контур, в датчике тока обязательно где-то присутствует обратный проводник. В зависимости от того, как этот проводник расположен относительно воздушного зазора магнитопровода и элемента Холла, его магнитное поле может влиять на выходной сигнал датчика. При анализе такого влияния полезно использовать правило правой руки. Важно соблюдать дистанцию между обратным проводником и датчиком, пропорциональную протекающему в нем току. Поле, создаваемое проводником, зависит от расстояния нелинейным образом. Принято считать, что на расстоянии более 10 см, как правило, влиянием обратного проводника можно пренебречь (рис. 2). Поскольку для большинства применений это расстояние недопустимо велико, оценкой приемлемого (пусть и не оптимального) расстояния может служить ширина датчика. Обратный проводник, находящийся в непосредственной близости от датчика, может и не влиять на его работу, если он расположен соответствующим образом относительно воздушного зазора магнитопровода и элемента Холла.

### Локальное насыщение

Существует такое своеобразное явление, как локальное насыщение, когда близко расположенный проводник (это не обязательно должен быть обратный проводник), находящийся за пределами апертуры датчика, влияет на его магнитопровод. Причем магнитное поле проводника, вызывающего локальное насыщение, не обязательно взаимодействует с воздушным зазором магнитопровода. Магнитное поле, создаваемое в расположенном поблизости от такого проводника участке магнитопровода, и магнитное поле от первичного проводника могут временами суммироваться и достигать уровня насыщения. Тем самым, по сути, нарушается кольцевая форма линий магнитного поля в магнитопроводе, и воспринимаемая элементом Холла индукция магнитного поля оказывается меньше той, которая должна создаваться первичным током. Следствием локального насыщения, как и вообще любого насыщения, является ослабление выходного сигнала элемента Холла. Выходной сигнал датчика оказывается меньше, чем должен быть при данном значении первичного тока. Это может оказаться критичным в системах управления, где датчик используется в цепи обратной связи. С ростом нелинейности характеристики датчика и выходом его в область насыщения, при котором ослабляется выходной сигнал, для достижения рабочей точки может потребоваться все больший и больший ток. В конечном счете нелинейность оказывается настолько большой, что возможен отказ в системе из-за сильного превышения фактического значения тока над измеренным.

### Эффекты переходных процессов напряжения $dv/dt$

Явление емкостной связи между двумя проводящими поверхностями хорошо изучено. Такая



связь проявляется при быстром изменении напряжения на первичном проводнике. Если между первичным проводником и любой частью вторичной цепи имеется емкостная связь, быстрое изменение напряжения на первичном проводнике может вызвать аналогичный переходный процесс на выходе вторичной цепи (в форме напряжения или тока). Это справедливо как для датчиков прямого усиления, так и для компенсационных датчиков. В компенсационных датчиках данная проблема может быть выражена сильнее, поскольку вторичная обмотка образует проводящую поверхность большей площади и, следовательно, более склонна к образованию емкостной связи. Эффекты переходных процессов напряжения бывают различными: одни представляют собой просто наложение исходного переходного процесса с некоторым масштабным коэффициентом на выходной сигнал, другие имеют вид бросков или шумов, источник которых определить затруднительно. Ослабить подобные эффекты можно путем поворота первичного проводника или датчика, уменьшения площади поверхности первичного проводника, обращенной к вторичной обмотке, а также удаления вторичной обмотки от того места, в котором предположительно возникает емкостная связь.

### Магнитные взаимодействия с внешней средой

В действительности датчики тока измеряют не ток, а отклонение тока в элементе Холла. Это отклонение пропорционально составляющей вектора индукции магнитного поля, перпендикулярной плоскости элемента Холла. Магнитное поле может претерпевать возмущения, связанные с положением первичного проводника, воздействием обратного проводника, остаточной намагниченностью и локальным насыщением датчика. Но первичный ток и сам датчик — это еще не все потенциальные источники погрешностей. На магнитное поле могут влиять и внешние магнитные поля, и находящиеся поблизости предметы из магнитных материалов (рис. 3). Большие катушки индуктивности, расположенные близко к датчику, способны вносить искажения в его работу. Определить направление поля  $B$  относительно плоскости

элемента Холла, а следовательно, и возможность влияния этого поля на результаты измерений можно с помощью правила правой руки. Еще один необычный эффект, проявляющийся в датчиках с прямоугольным магнитопроводом, — рассеяние магнитного потока. Линии магнитного поля стремятся к форме окружности. В случае прямоугольного магнитопровода возникает поток рассеяния, и воспринимаемый элементом Холла магнитный поток оказывается меньше при том же значении первичного тока. Этот эффект становится более выраженным с приближением к верхней границе линейной области кривой намагничивания магнитопровода. Предметы из ферромагнитных материалов, находящиеся поблизости от элемента Холла, могут вызвать отклонение магнитного потока за пределы магнитопровода с элементом Холла в его зазоре. Это может привести к нелинейному поведению датчика. При эксплуатации датчика в пределах технических характеристик, приведенных в техпаспорте, данный эффект наблюдаться не будет. Однако датчик с прямоугольным магнитопроводом, эксплуатируемый в пределах технических характеристик и закрепленный на основании из ферромагнитного материала (стальной листе), способен демонстрировать большую нелинейность при приближении к максимальному току, чем можно было бы ожидать.

### Взаимное расположение датчиков

Расположение датчиков бок о бок — не лучший вариант. Датчики следует размещать на определенном расстоянии друг от друга или в шахматном порядке (рис. 4). При этом магнитные поля, создаваемые первичными проводниками датчиков, не будут влиять на соседние датчики. Такая расстановка датчиков вкупе с правильным положением элемента Холла внутри датчика обеспечит более точное измерение токов.

### Отвод тепла от датчика, смонтированного на печатной плате

При рассмотрении площади поперечного сечения токовой шины датчика тока, смонтированного на печатной плате, очевидным ограни-

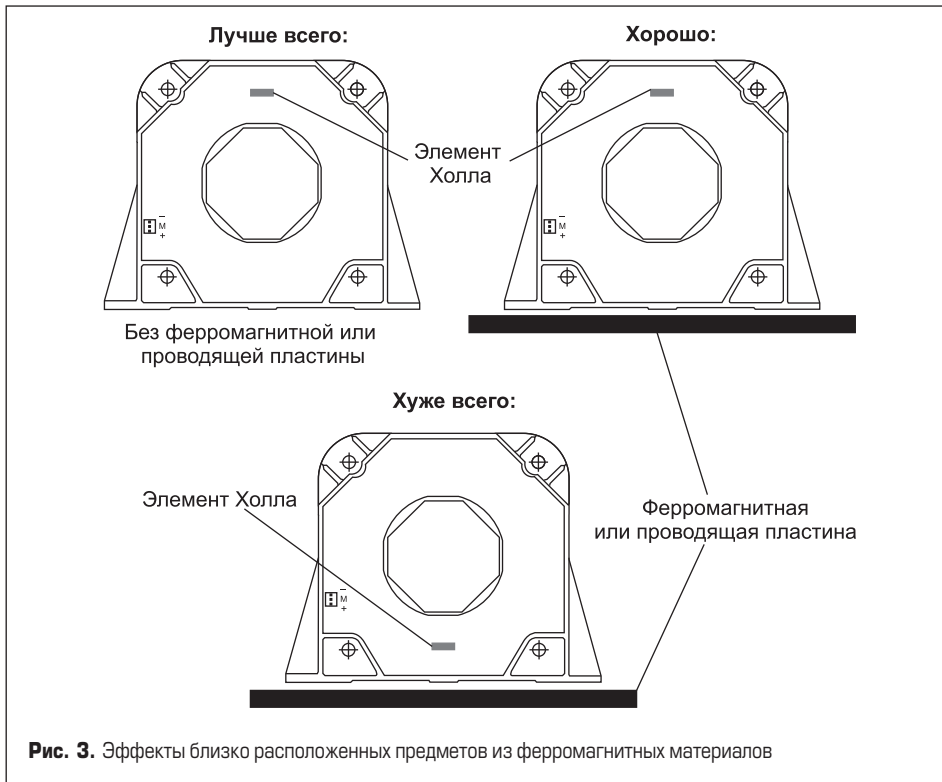


Рис. 3. Эффекты близко расположенных предметов из ферромагнитных материалов

чивающим фактором является рассеяние тепла. Медный проводник способен выдерживать ток плотностью 75 А/мм<sup>2</sup>, если обеспечить адекватный отвод тепла. Обычно проектировщики выполняют тепловой расчет с запасом. Однако размер датчика имеет значение: чем он меньше, тем он, как правило, меньше стоит и тем компактнее может быть готовое изделие. При надлежащем теплоотводе датчик LEM HLSR 50-P обеспечивает измерение тока силой 150 А в непрерывном режиме. Это внушительная цифра для устройства размером с почтовую марку. Хотя сопротивление токовой шины датчика составляет всего 200 мкОм, теплоотвод для него обязателен.

Поскольку существует три механизма теплоотвода (кондуктивный, конвективный и излучательный), лучше всего провести оптимизацию по одному или двум из них. Температуры, с которыми приходится иметь дело, не позволяют всерьез полагаться на излучательный теплоотвод. Конвекцию можно усилить, предусмотрев вентилятор для создания потока воздуха через датчик и над близлежащими дорожками первичного проводника на печатной плате. Итак, для отвода тепла с токовой шины на печатную плату применяется кондуктивный механизм, а для отвода тепла от печатной платы — конвективный. Во многих случаях размеры дорожек

первичного проводника на печатной плате минимизируются. Увеличив их, можно повысить эффективность отвода тепла. Следует найти разумный компромисс между размером токовой шины датчика и площадью поверхности токоведущих дорожек, доступной для отвода тепла. Использование дорожек минимально возможного размера, скорее всего, не является оптимальным вариантом.

**Заключение**

Обычно применение датчиков тока не вызывает затруднений. Если все же выходной сигнал датчика выглядит не так, как ожидалось, причиной тому могут быть явления механического, магнитного и электрического характера. Взаимодействие эффектов различной природы способно привести к возникновению трудно диагностируемых симптомов. Автор надеется, что эта статья поможет в понимании причин некоторых явлений и ускорит поиск решений. Следует иметь в виду, что в датчиках используются магнитопроводы из разных материалов с разными характеристиками линейности и насыщения. Значения в процентах в приведенных выше примерах даны относительно максимального измеряемого тока и могут варьироваться в зависимости от материала магнитопровода и принципа работы датчика (прямое усиление или компенсация). Однако по порядку величины фактические значения будут хорошо согласовываться с указанными здесь.

*Автор благодарит коллег из исследовательского подразделения компании LEM за предоставленную ими информацию, которая составляет большую часть изложенного здесь материала, а также за иллюстрации. Кроме того, автор выражает благодарность коллеге по LEM Ришару Вюадансу (Richard Vuadens) за редактирование этой статьи и ценные замечания.*

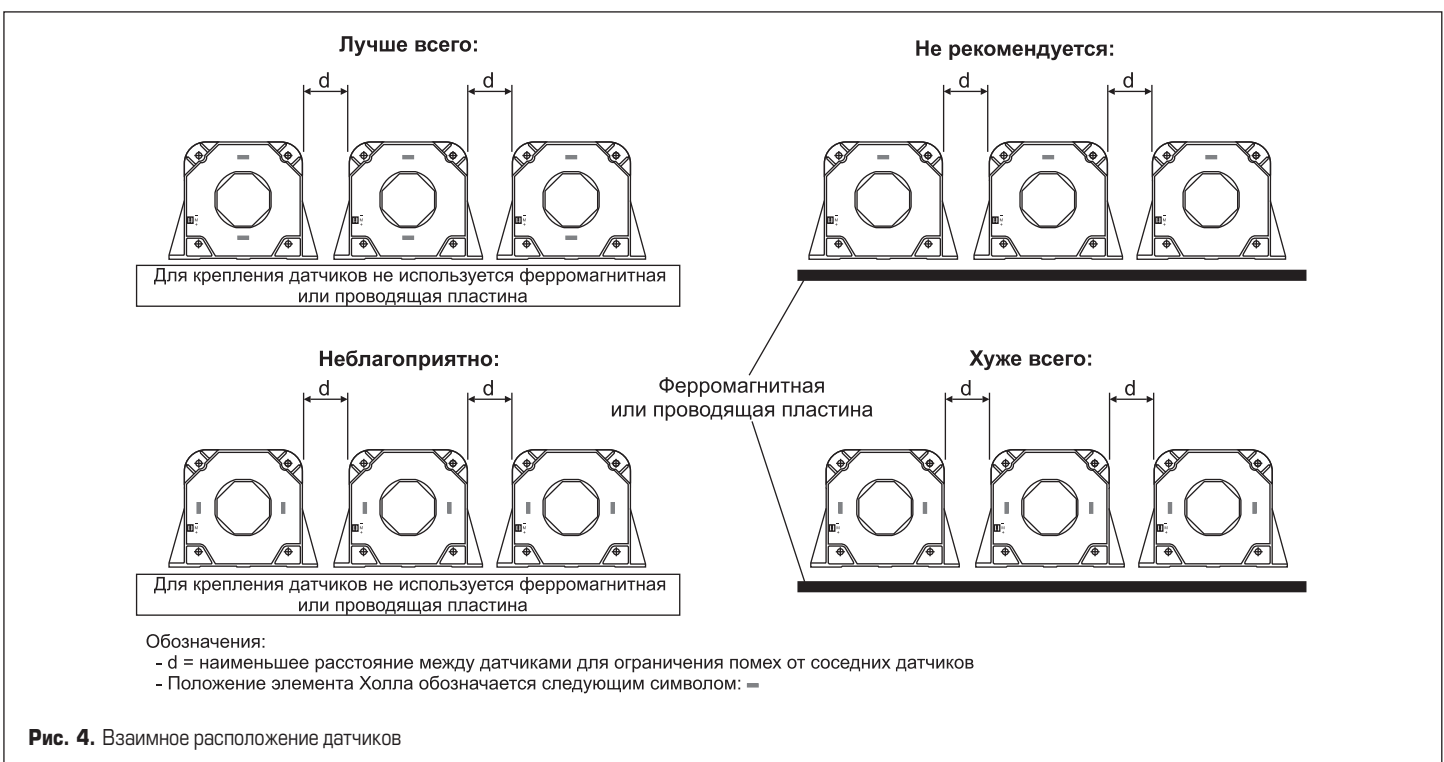


Рис. 4. Взаимное расположение датчиков