

НОВЫЙ КЛАСС ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ КАТУШЕК РОГОВСКОГО

ПЬЕР ТЮРПЕН (PIERRE TURPIN), менеджер проектов Energy & Automation, LEM

Контроль потребления мощности становится ключевым фактором в управлении электросетями как в промышленном, так и в коммерческом секторах (промышленных зданиях, информационных центрах, пищевой промышленности, предприятиях торговли, медицинских и образовательных учреждениях). В статье подробно рассказывается о достигнутых преимуществах датчиков на основе катушек Роговского, которые по комплексу параметров могут успешно конкурировать с лучшими токовыми трансформаторными датчиками в секторе измерения электрической энергии.

Поначалу при разработке серии датчиков на основе катушек Роговского казалось, что требуемый диапазон измерения токов не превышает 100 А. Однако вскоре выяснилось, что этого недостаточно для сектора промышленных сетей, где в процессе мониторинга в исходных узлах сети требуется диапазон до 2000 А. Компания LEM разработала серию датчиков тока RT, учитывающих специфику данного применения и обеспечивающих такую же гибкость при монтаже, что и датчики тока на базе трансформаторов с разъемным сердечником. Кроме того, датчики серии RT обеспечивают точность измерений для оборудования класса 1, необходимую для сектора приложений с измерением токов среднего диапазона. Традиционные индуктивные трансформаторы тока и напряжения с ферромагнитным сердечником имеют определенные недостатки, вызванные самой природой таких трансформаторов: насыщение, гистерезис, резонанс, остаточное намагничивание.

Катушка Роговского (Rogowski coil) является лучшим выбором при создании измерительных систем в электрических сетях, поскольку обеспечивает простоту применения для большинства базовых измерительных схем и отвечает всем требованиям как по диапазону измерения, так и по точности. Известные до недавнего времени конструкции датчиков на базе катушек Роговского имели недостаточную точность ввиду чувствительности к положению токовой петли относительно оси проводника.

ОТ ТЕОРИИ — К ПРАКТИКЕ

Конструкция и принцип работы катушки Роговского были впервые описаны в [1]. Катушка Роговского — это тороидальная катушка, расположенная вокруг первичного провода точно так, как вторичная обмотка в обычном трансформаторе тока, но только

без ферромагнитного сердечника (см. рис. 1).

Напряжение сигнала на выходе датчика пропорционально производной тока:

$$U = M \cdot di/dt,$$

где M — взаимная индуктивность между проводником тока и катушкой.

Значение тока можно вычислить или получить аппаратно с помощью аналогового интегратора.

Вся трудность при использовании данного метода измерения заключается в обеспечении достаточной точности, поскольку вычисление основано на предположении абсолютной симметрии положения катушки относительно проводника с измеряемым током и идеальности геометрии самой катушки. Только при выполнении этих условий индуктивность M сохраняется постоянной. Однако на практике это недостижимо. Проиллюстрируем данный вывод, рассмотрев три фактора, влияющих на однородность индуктивности катушки.

Плотность витков. Намотка катушки должна быть регулярной и однородной по всей длине. Витки, не эквидистантные по отношению к проводнику измеряемого тока, создают асимметрию, приводя к изменению коэффициента индуктивности M относительно проводника. Фактически это приводит к ошибке измерения в зависимости от положения катушки относительно измеряемой силовой шины или кабеля. Ошибка больше, чем ближе катушка к кабелю.

Сечение катушки. Та же ситуация, что и с плотностью витков. Если сечение неоднородно вдоль длины катушки, окружающей проводник, индуктивность M не является постоянной, что приводит к ошибке измерения.

Защелка катушки. Главное преимущество гибкой катушки Роговского состоит в том, что она обеспечивает бесконтактное измерение тока, но при

этом внутри нее присутствует проводник обратного тока. Разрыв однородности плотности витков катушки в месте защелки является главным источником асимметрии. Ошибка измерения вследствие этой неидеальности катушки является наибольшей из всех рассмотренных.

РЕАЛЬНЫЕ ЦИФРЫ

До настоящего времени датчики на основе катушек Роговского обеспечивали погрешность измерения в зависимости от позиционирования проводника внутри петли не лучше 2%. На практике довольно часто возникают сложности с размещением проводника точно по центру петли. При смещении проводника в область замка петли погрешность может достигать 6%. По этой причине легко понять, почему производители измерительного оборудования для электрической энергии стараются избежать использования датчиков этого типа.

Однако компания LEM доказала жизнеспособность этой технологии для измерения энергии. В настоящее время точность датчиков стала в большей степени зависеть от качества намотки самих катушек, а погрешность, обусловленная несимметричностью их обмотки, может быть менее 0,75%. Для того чтобы использовать датчик в измерителе энергии класса 1, требуется обеспечить суммарную погрешность лучше, чем 1%, включая погрешность

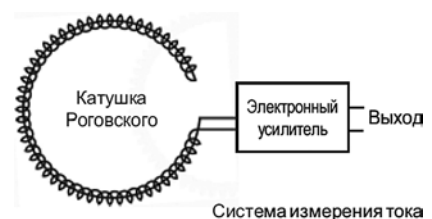


Рис. 1. Структура измерителя тока на базе катушек Роговского



Рис. 2. Конструкция защелки токовой петли датчика типа «магнитная муфта»

токового датчика, датчика напряжения и погрешность обработки данных.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Главной проблемой токового датчика на основе катушки Роговского является ошибка, связанная с несовершенством замка замыкания измерительной петли. Неоднократно предпринимались попытки решить эту проблему на основе электрической или механической концепций, однако успех был незначительным.

Благодаря изучению магнитных явлений в системе «катушка-проводник» удалось разработать простое и эффективное решение — соединительную муфту для измерительной петли из ферромагнитного материала (см. рис. 2). С одной стороны, она обеспечивает электрическое соединение вторичных обмоток датчика, а с другой, позволяет создать внутреннюю зону вокруг катушки магнитно невидимой, и таким образом маскировать неоднородность индуктивности в области защелки петли. Муфта работает как магнитная перемычка (или, точнее, как магнитное сопротивление), «виртуально» соединяя две секции обмоток, находящиеся на разных сторонах защелкиваемой токовой петли. Этот подход привел к успеху — ошибка, связанная с локальным разрывом в токовой петле датчика, стала ничтожно мала.

СКРЫТАЯ ПРОБЛЕМА

Погрешность, связанная с конструкцией замка катушки измерительной системы скрывала другие проявления асимметрии датчика. Когда главная проблема с контактным замком для катушек Роговского была решена, появились и стали заметны проблемы другого порядка, которые несколько омрачили успех использования магнитной муфты. Специалисты LEM продолжили работу по совершенствованию датчика тока, разработав спустя два года технологию и оборудование, которые значительно уменьшили ошибку, связанную с асимметричностью конструкции. Во многом это стало возможным благодаря реализации непрерывности и однородности секций катушек на всей протяженности измерительной петли.

Сегодня ошибка за счет асимметрии позиционирования катушки относи-

тельно проводника составляет максимум 0,65% (для проводника с диаметром жилы 15 мм независимо от его расположения, даже если он находится непосредственно у защелки катушки).

РАБОТА В ЖЕСТКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Характеристики катушки Роговского определяются в основном ошибкой, связанной с позиционированием проводника внутри измерительной петли датчика. Кроме того, хороший датчик не должен быть чувствителен к влиянию токов от других проводников, расположенных вне измерительного контура. Как правило, при корректной конструкции петли оба эти параметра в равной мере хороши и, наоборот, при неудачной конструкции токовой петли датчика происходят большие ошибки, связанные с позиционированием проводника внутри петли датчика и чувствительностью к помехам. Это обстоятельство является следствием теоремы Ампера, в соответствии с которой любые ошибки, вызванные асимметрией конструкции, одинаково проявляются как внутри токовой петли, так и вне ее.

Например, проводник с током в 100 А, находящийся внутри токовой петли катушки Роговского в непосредственной близости от оболочки петли, вызовет индуцированную ошибку при измерении на уровне 0,5%. Следовательно, измеренное значение составит 100,5 А. Тот же проводник, расположенный вне охвата петель, также вызовет ошибку сигнала на 0,5 А, но этот сигнал добавится к измеренному значению тока, который протекает по проводнику внутри петли.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Точность измерения токового датчика на основе катушки Роговского невысока т.к. коэффициент передачи, определяемый, в основном, значением индуктивности M , зависит от физических параметров, которые трудно контролировать при массовом производстве.

В настоящее время технологический разброс параметров катушки Роговского составляет 2—5% в зависимости от технологии.

Производить данный тип датчика с меньшим разбросом коэффициента передачи нереально. Для большей точности требуются намоточные станки, в которых шаг витков контролируется с точностью до нескольких микронов. Это сильно усложнит технологию и скажется на цене датчика. Для более высокой точности следует выполнить калибровку датчика, используя активную или пассивную схемы. С другой стороны, калибровка гарантирует высокую стабильность параметров датчика, в част-

ности, по отношению к температуре, и позволяет предотвратить сдвиг уровня выходного сигнала датчика. При изменении температурных условий может проводиться перекалибровка и компенсация сдвига сигнала. Например, датчики LEM серии RT обеспечивают температурную стабильность во всем рабочем диапазоне измерения на уровне 30 ppm/°C.

НАСЫЩЕНИЕ ДАТЧИКА

Одним из частых вопросов, связанных с проектированием измерительных систем, является вопрос о возможности насыщения датчика на границе допустимого диапазона токов. В случае с датчиками на базе катушек Роговского насыщение теоретически недостижимо, поскольку в их конструкции нет ферромагнитных сердечников. На практике диапазон измерения определяется диаметром измерительной петли датчика и номинальным значением тока в цепи измерения. В отдельных случаях при наличии импульсных сигналов с большой крутизной может происходить ограничение амплитуды сигнала на катушке датчика.

ЛИНЕЙНОСТЬ

Наряду с точностью важна также линейность измерений. Датчик на основе катушек Роговского не имеет нелинейных элементов в своей конструкции, поэтому линейность измеряемых сигналов гарантирована во всем диапазоне. Если факты нелинейности все же обнаруживаются, следует разобраться, насколько подходящий метод измерения используется. В некоторых случаях вместо катушки Роговского следует выбрать для измерений другой тип датчика.

ФАЗОВЫЙ СДВИГ

Фазовый сдвиг выходного сигнала является очень важным параметром при измерении энергии, которая вычисляется на основе измеренных значений тока и напряжения. Катушка Роговского в этом отношении является идеальным решением и не дает дополнительных фазовых сдвигов. Однако следует учесть фазовый сдвиг, который может произойти в цепи интегратора при усилении и нормировке сигнала. Фазовый сдвиг равен нулю при разомкнутой петле измерения, но как только она переходит в активный режим, интегратор внесет фазовый сдвиг. Однако эту ошибку можно легко компенсировать с помощью соответствующих вычислений или симуляцией эквивалентной RLC-цепи.

ВЫБОР, СДЕЛАННЫЙ LEM

В настоящее время датчики на основе катушек Роговского по комплексу параметров могут успешно конкури-

Actel®

Космические технологии по земным ценам в Ваших руках! Программируемая логика для коммерческого, промышленного и авиационно-космического применений



Корпорация выпускает широкий спектр однократно и многократно программируемых ПЛИС на основе технологий Antifuse и Flash, которые успешно применяются в различных областях: от бытовых портативных устройств до авиационно-космической аппаратуры. В новом поколении семейств Flash ПЛИС Actel, к легендарной надежности программируемой логики Actel добавилась высокая производительность и низкая цена.



- Минимальное энергопотребление
- Энергонезависимость
- Готовность к работе по включению литания
- Высочайшая надежность
- Иммунитет к сбоям под воздействием тяжелых частиц
- Защита от несанкционированного копирования
- Высокая производительность
- Выгодное соотношение цены и качества

Представительство Actel в России и Украине:

196066, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 212 Тел./факс: +7 (812) 740 62 09 www.actel.ru
Бесплатный звонок со всех мобильных и стационарных телефонов: 8-800-100-62-09

ровать с лучшими токовыми трансформаторными датчиками в секторе измерения электрической энергии. Их преимущества — высокие токи, дешевизна, малые размеры, вес, гибкость и легкость монтажа — могут стать определяющими для ряда приложений. Поперечное сечение токовой петли датчиков LEM составляет всего 5 мм. Относительно объектов измерения можно сказать, что датчик имеет универсальные размеры.

Размеры запатентованной конструкции защелки токовой петли датчика также очень малы (всего 28×30×16 мм) и обеспечивают надежное соединение петли коаксиального сигнального кабеля. Для передачи сигнала был выбран коаксиальный кабель, соответствующий низкому профилю поперечного сечения катушки. Для обеспечения временной и температурной стабильности параметров катушка RT заключена в полиуретановую оболочку.

ИНТЕГРАТОР ДЛЯ КАТУШКИ РОГОВСКОГО

Катушка Роговского обеспечивает напряжение, пропорциональное производной по изменению тока в проводнике. Следовательно, для преобразования полученного сигнала в сигнал, пропорциональный измеряемому току, необходим интегратор. Он является важным компонентом в системе измерения тока на основе катушки Роговского.

Интегратор определяет коэффициент передачи. От его свойств зависят линейность, фазовый сдвиг и полоса рабочих частот. Недостаток интегратора с вариантами возможных решений заключается в очень низком уровне входного сигнала — 20 мВ/кА для датчиков LEM серии RT. Для решения этой проблемы рекомендуется использовать малошумящие операционные усилители и минимизировать площадь печатной платы с элементами интегратора, чтобы снизить чувствительность к наводкам паразитных сигналов внешних полей. Для формирования полосы пропускания измерительного тракта датчика должны использоваться два типа частотных фильтров: высоких и низких частот.

КАЛИБРОВКА: АКТИВНАЯ ПОДСТРОЙКА КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

Коэффициент передачи катушки Роговского определяется конструкцией и не может быть точным из-за несовершенства технологического процесса. Поэтому, чтобы точно подстроить коэффициент передачи, необходимо проведение калибровки по отношению к опорному сигналу. Инженеры используют в основном каскад аналогового интегратора, в котором в цепи регулировки имеется подстроечный резистор. Лучшим решением является цифровая калибровка, которая реализуется на основе микроконтроллера в комбина-

ции с усилителем с программируемым коэффициентом усиления или цифровым потенциометром.

КАЛИБРОВКА: ПАСИВНАЯ ПОДСТРОЙКА УСИЛЕНИЯ

Исторически катушка Роговского использовалась для измерения среднеквадратичных значений тока без фазовых ограничений. Большинство решений для калибровки датчика основано на использовании простых резистивных или резистивно-емкостных схем. Достоинство метода измерения — простота и экономичность. К сожалению, метод не подходит для измерения мощности из-за большого фазового сдвига, который может зависеть и от частоты измерения, если используется RC-схема. При разработке нового датчика на катушках Роговского компания LEM предложила базовый продукт, исходя из того, что технология интегратора, выбранного разработчиками измерительной системы, обеспечит оптимальные параметры, а сам метод хорошо известен. В результате было принято решение не калибровать датчики тока семейства RT на самом производстве. В состав датчика не входит каких-либо дополнительных электронных компонентов или крепежных приспособлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Die Messung der magnetischen Spannung//Archiv für Elektrotechnik. 1912.

НОВЫЕ ДАТЧИКИ

| МОНОЛИТНЫЕ И ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ СИГНАЛА | Компания Metallux SA, (Мендризио, Швейцария) в рамках расширения своей программы выпуска пьезорезистивных датчиков давления представляет новую разработку. Теперь предлагаются монолитные и пьезорезистивные датчики давления со встроенной схемой преобразования сигнала. Кроме хорошо известных преимуществ керамических датчиков давления, это обеспечивает также более высокий уровень интеграции обычного оборудования.

Конструкция датчика

В основе нового семейства лежат широко известные серии безфланцевых и монолитных датчиков: ME501/505 и ME662. Характеристики этих датчиков были оптимизированы. Для плат дополнительного преобразования сигнала использована трафаретная печать. Настройка датчиков теперь производится с помощью обрезки проводников, а не резисторов. Был усовершенствован процесс сборки и распайки выводов датчиков. Датчики серий ME75x и ME77x выпускаются для измерения относительного и абсолютного давления. Преобразование сигнала осуществляется на печатной плате посредством 4-выводных рамок, припаянных к чувствительному элементу. В датчиках реализована электронная калибровка по давлению и температуре с помощью встроенной специализированной ИС. Этот новый подход обеспечивает более высокую точность и стабильность параметров.

КЕРАМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ					
ME501 / ME505 0,5 ... 600 [Bar] Отн. / Абс. / Изб.			ME662 2 ... 400 [Bar] Относительное		
ME770 0,5 ... 4,5 Vdc	ME771 0 ... 10 Vdc	ME772 4 ... 20 mA	ME750 0,5 ... 4,5 Vdc	ME751 0 ... 10 Vdc	ME752 4 ... 20 mA

Рис. 1. Серия датчиков давления

Серии датчиков

Серия ME77x (см. рис. 1 и 2) построена на базе датчиков ME501/505 и подходит для измерения относительного, абсолютного и избыточного давления. Серия ME75x (см. рис. 1 и 3) построена на базе ME662. Обе серии датчиков предлагаются с тремя различными типами выходного сигнала.

Для 3-проводного датчика с изменяющимся напряжением предусмотрены два выхода:

- Аналоговый логометрический выход 0,5...4,5 BDC;
- Аналоговый выход 0,5...4,5 BDC.

Для 2-проводного датчика с изменяющимся током предусмотрен

- Аналоговый выход 4...20 mA.



Рис. 2. Датчики давления ME770-771-772



Рис. 3. Датчики давления ME750-751-752

Электронный блок датчиков испытан на электромагнитную совместимость и соответствует стандарту EN61000-4-6. Логометрический выход позволяет производить проверку полярности и обеспечивает защиту от перенапряжения.

Особенности и преимущества датчиков

- Стабильность параметров: не менее 0,2% от полной шкалы в год.
- Точность: не менее 1% от полной шкалы.
- Температурная компенсация.
- Электромагнитная совместимость (в стальном корпусе).
- Возможность работы в агрессивной среде.
- Автоконтроль.
- Калибровка по индивидуальному заказу.
- Высокая линейность и малая величина гистерезиса.

METALLUX
ELTEK GROUP

Датчики давления

стандартные и на заказ

ШВЕЙЦАРСКОЕ КАЧЕСТВО НА РОССИЙСКОМ РЫНКЕ

АСС АППАРАТУРА СИСТЕМ СВЯЗИ

125363, г. Москва, ул. Штурвальная, д. 3, стр. 1
тел./факс (495) 925-50-12, <http://www.escltd.ru>