

Как выбирать и применять датчики тока

для высокопроизводительных и экономичных систем контроля мощности

Бертран Клайбер
(Bertrand Klaiber)

Пьер Турпин
(Pierre Turpin)

Введение

Анализ мощностных характеристик любого электронного устройства предполагает измерение тока с заданными электрическими и механическими характеристиками, соответствующими различным областям применения. Измерительные трансформаторы тока с неразъемными сердечниками способны обеспечить хорошие параметры при низких затратах, однако в последнее время наблюдается большой прогресс технологий измерения тока с помощью трансформаторов с разъемными сердечниками, особенно если надо оснастить измерителями мощности уже действующее оборудование.

Трансформаторы тока с разъемными сердечниками не являются принципиально новыми, хотя в прошлом они были громоздкими и тяжелыми и создавались с применением традиционных технологий, имеющих многочисленные недостатки. При производстве таких устройств или использовались дорогие материалы, или точность измерения тока у подобных сенсоров оставалась невысокой. В данном случае, невысокая точность обусловлена в основном нелинейностью, погрешностью фазового сдвига выходного тока и стабильностью параметров в течение срока службы. В статье приводится анализ традиционных методов измерения тока и некоторых инновационных решений, отмечаются их преимущества и недостатки для разных областей применения.

Области применения измерителей мощности

Измерение электрической мощности лежит в основе многих промышленных устройств в следующих областях:

- управление электропитанием;
- контроль потребления электроэнергии;
- мониторинг состояния объектов.

Управление электропитанием является основной областью применения сенсоров тока, поскольку име-

ет важнейшее значение для любых промышленных и коммерческих систем. В основном это касается компаний, занятых выработкой и распределением электроэнергии, а также профессиональным промышленным мониторингом качества энергии и коэффициента мощности для контроля соблюдения тарифов в сфере коммунальных услуг, особенно при работе с нагрузками, имеющими низкий $\cos \phi$.

Контроль потребления энергии приобретает все большее значение для промышленных предприятий, поскольку он позволяет отслеживать и оптимизировать затраты, а также выполнять расширенный анализ расхода энергии для повышения эффективности ее использования. Параметры источника питания часто зависят от пикового потребления, а управление динамическими характеристиками системы позволяет сокращать затраты и предотвращать выходы из строя. Контроль расхода энергии необходим для понимания и согласования режимов основных потребителей, а также для определения потерь энергии, в основном связанных с неправильным или неэффективным использованием (например, избыточное освещение, отопление или кондиционирование).

Мониторинг состояния требует мгновенного обнаружения неисправности и соответствующей реакции, чтобы предотвратить повреждение оборудования или остановку важных производственных процессов. Контроль энергетических параметров предоставляет полную информацию (ток, активная мощность, коэффициент мощности, частота и др.), отражающую состояние нагрузки двигателя (например, конвейера, насоса, режущего инструмента и т. п.). Он часто обеспечивает более оперативное обнаружение аномального поведения, чем традиционные датчики температуры, давления, вибрации и др. Анализ временных изменений этих электрических параметров даже позволяет прогнозировать наступление отказа, что необходимо для организации эффективного профилактического обслуживания.

Измерение мощности приобретает все большее значение не только в промышленности, но и при

контроле нагрузки в коммерческих и бытовых применениях. Энергосбережение становится актуальной проблемой во всем мире, как по экономическим, так и по экологическим соображениям. Ключевой вопрос состоит в том, как добиться существенного и устойчивого сокращения потребления энергии? Наиболее верное решение будет найдено, если пользователи начнут понимать, как они потребляют энергию, и станут ответственными за это. В первую очередь сказанное относится к промышленным предприятиям, однако это приобретает все большее значение и для государственного сектора. Во многих странах проводятся кампании и разрабатываются бюджетные стимулы, направленные на сокращение потребления энергии. Эффективное использование таких стимулов требует от организаций создания точных средств измерения.

Требования к измерителю тока

Разработчики систем мониторинга электроснабжения должны тщательно выбирать датчики тока с учетом их специфических характеристик.

Точность

В большинстве применений точность измерения напрямую влияет на эффективность работы системы в целом. Очевидно, что правильность расчетов мощностных характеристик зависит от точности датчиков тока. Измеритель мощности класса точности 1 требует применения сенсора с погрешностью намного лучше, чем 1%, для изготовления которого необходимы дорогие материалы и производственные процессы. Альтернативный вариант состоит в индивидуальной калибровке измерителя под конкретный датчик тока. Учет конкретных параметров каждого сенсора позволяет использовать его в наиболее точном рабочем режиме и снизить разброс параметров от одного экземпляра к другому. Как мы увидим далее, это открывает возможности применения новых технологий, обеспечивающих высокую линейность, малый дрейф и хорошую повторяемость, путем компенсации индивидуальных погрешностей датчиков.

Дрейф

Дрейф датчика определяется стабильностью его показаний в течение срока службы независимо от первоначальной калибровки системы. Некоторые вариации характеристик сенсора могут быть вызваны изменением влажности и температуры окружающей среды, старением элементов и т. п. Низкий уровень дрейфа означает, что датчик имеет высокую стойкость к таким воздействиям. Это очень важная характеристика для построения высокопроизводительных, стабильных и надежных измерителей мощности.

Линейность

Линейность датчика определяет стабильность его характеристик в пределах рабочих режимов. Высокая линейность аналоговой части сенсора необходима для точного изме-

рения в широком диапазоне токов, особенно при их малых уровнях. Различные технологии обеспечивают хорошие характеристики только в ограниченном диапазоне измерений, что ограничивает область применения в узком спектре либо только больших, либо только маленьких токов.

Фазовый сдвиг

Фазовый сдвиг — точность расчета истинного значения активной мощности или энергии определяется точностью и линейностью измерения не только амплитуды переменного тока и напряжения, но и фазового сдвига, возникающего между этими связанными между собой электрическими величинами. Фазовый сдвиг, безусловно, должен быть как можно ниже.

Интеграция

Трансформатору тока не требуется дополнительное питание, а нужно только два провода для подключения выхода к системе контроля мощности. Многие из них имеют стандартные калиброванные выходы для интеграции в систему контроля мощности. Типовые выходы 1 А, 5 А или 333 мВ совместимы с большинством стандартных промышленных измерителей мощности. Для ваттметров высокой точности необходима калибровка по каждому датчику, которые после этого нельзя заменять. При эксплуатации в системе трансформаторы со слаботочным выходом более безопасны, чем с традиционным выходом 1 А/5 А, и таким образом, к ним есть доступ в процессе работы системы. Токвые же выходы практически нечувствительны к наводкам, а потому предпочтительнее для использования в тех случаях, когда для трансформатора требуется подключение к измерителю мощности длинным кабелем.

Цена

Цена датчика важна особенно в том случае, когда для измерения мощности в 3-фазной сети нужно три точных сенсора. Однако их стоимость не должна рассматриваться отдельно, необходимо учитывать также расходы на установку и обслуживание устройства. Использование хотя и более дорогого, но надежного и простого в установке и замене датчика с разъемным сердечником может реально снизить стоимость системы в целом.

Токвые трансформаторы с разъемным сердечником

В системах измерения мощности, как правило, используются бесконтактные сенсоры тока, поскольку резистивные шунты создают потери мощности, а также проблемы с точкой зрения установки и безопасности. В традиционных неразъемных датчиках тока применен принцип трансформатора, то есть они содержат первичную и вторичную обмотки, имеющие магнитную связь посредством сердечника. Измеряемый ток индуцирует магнитное поле в сердечнике, которое генерирует ток во вторичной обмотке, его величина пропорциональна первичному току, делен-

ному на число витков вторичной обмотки. Подобные стандартные трансформаторы тока предназначены для измерения переменного синусоидального тока частотой 50/60 Гц. Эта хорошо известная технология широко доступна благодаря использованию традиционных материалов и производственных процессов.

Стандартные трансформаторы тока предлагают экономически эффективное и достаточно точное решение для применения в счетчиках электроэнергии, используемых в новом оборудовании и зданиях. Однако они не пригодны для многочисленных приложений, связанных с энергетическим мониторингом существующих промышленных установок и машин, где для этого было бы необходимо выключать питание и отсоединять кабели для монтажа неразъемных датчиков во всех местах, где они могут использоваться. Установка системы учета электроэнергии в целом невозможна, за пределами дорожки или даже опасна, если она требует прерывания процесса даже на короткое время (например, остановка производственной линии, отключение питания телекоммуникационных станций, оборудования АЭС и т. д.).

Токвые трансформаторы с разъемным сердечником

Бесконтактный автономный (не требующий питания) трансформатор тока с разъемным сердечником может просто защелкнуться на измеряемом проводнике, при этом отсутствует необходимость использования резьбовых или сварных соединений или сложных кронштейнов, что значительно упрощает их установку и обслуживание (рис. 1). Они могут устанавливаться в приборных щитах, таким образом упрощая разводку выводов, и осуществлять удаленный мониторинг устройств, которые иногда эксплуатируются в труднодоступных местах или при неблагоприятных условиях. Преимущество трансформаторов с разъемным сердечником состоит в том, что они могут встраиваться в действующую систему без нарушения ее структуры, что в ряде случаев делает их единственным шансом для конструкторов систем измерения мощности.

Однако данные преимущества имеют свою цену: такие трансформаторы тока дороже, а точность их ниже, чем у неразъемных трансформаторов. Поэтому очень важно понимать разницу между различными существующими технологиями и делать выбор в соответствии с конкретной областью применения.

Работа трансформаторов тока с разъемным сердечником основана на том же принципе, что и у описанных выше неразъемных. Разница состоит в том, что в этом случае магнитный сердечник изготовлен из двух частей, которые можно разъединить. Ухудшение точности в основном вызвано несовершенством контакта между двумя частями и тем фактом, что вторичная обмотка распределена не вокруг всего сердечника, а только на одной из его половин. Цена и параметры таких трансформаторов тесно связаны с их физическими и механическими особенностями. Обязательным



Рис. 1. Токовый трансформатор (1000 А) с разъемным сердечником



Рис. 2. Трансформатор тока с ферромагнитным разъемным сердечником (800 А) и с ферритовым разъемным сердечником (100 А)

условием является высокая плоскостность контактных поверхностей, а также достаточное усилие сжатия двух частей сердечника. Датчик, как правило, снабжен специальными гибкими пружинными петлями, обеспечивающими достаточное сжатие и надежный механизм открывания.

Токовые трансформаторы с разъемным сердечником из ферросилиция FeSi (электротехническая сталь)

Электротехническая сталь широко используется в трансформаторах с разъемным сердечником в основном благодаря доступной цене. Характеристики у данного материала довольно плохие, что связано с низкой линейностью (особенно на малых токах) и большим фазовым сдвигом (рис. 1). Это ограничивает область применения подобных трансформаторов диапазоном больших токов, и теми областями применения, где не требуется высокая точность. Во многих случаях нужна только грубая оценка расхода энергии для выявления основных потребителей, а не для точного подсчета их энергопотребления.

Иногда достаточно определить, является устройство потребителем электроэнергии или нет, и сформировать временной профиль работы, предполагая, что значение напряжения неизменно и его точное измерение здесь не требуется. В этом случае большой фазовый сдвиг не становится проблемой. Типичным случаем является мониторинг токов в приборных щитках, позволяющий системе определить состояние перегрузки в какой-либо цепи и вырабатывать сигнал аварии или перераспределить нагрузку. Другим недостатком FeSi-трансформаторов тока остается большой вес и габариты, поэтому они не подходят для установки в устройства с ограниченным пространством.

Токовые трансформаторы с разъемным сердечником из ферроникеля (пермаллоя) FeNi

В течение длительного времени благодаря очень хорошим характеристикам FeNi считался лучшим материалом для изготовления трансформаторов с разъемным сердечником, несмотря на высокую стоимость. Пермаллой становится хорошей альтернативой FeSi в тех случаях, когда точность и малый фазовый сдвиг являются важными параметрами или когда трансформатор нужен для измерения малых токов.

Кроме цены, FeNi-трансформаторы имеют и некоторые другие ограничения. Как и громоздкие FeSi-трансформаторы, они занимают ценное пространство в промышленных объектах и шкафах управления. К их недостаткам также относится довольно плохая линейность и высокий дрейф, что в основном связано с наличием воздушных зазоров, неизбежных при разъемной конструкции сердечника.

Токовые трансформаторы с ферритовым разъемным сердечником

Хотя ферритовые материалы были хорошо известны в течение многих лет, низкие значения индукции насыщения и магнитной проницаемости не позволяли использовать их на таких низких частотах, как 50/60 Гц. Однако последние технологические достижения кардинально изменили характеристики ферритов на низких частотах и обеспечили массу преимуществ от их применения в широком спектре приложений, связанных с энергетическим мониторингом. У новых типов ферритов значительно улучшена магнитная проницаемость, что позволяет использовать их в трансформаторах тока вместо FeNi- или FeSi-сердечников, несмотря на низкий уровень магнитного насыщения.

Трансформаторы с разъемным сердечником на основе новых видов ферритов могут выпол-

нять точные измерения сигналов переменного тока в расширенном диапазоне частот, включая 50/60 Гц (рис. 2). Они используют присутствие ферриту качества, обеспечивающие высокую точность и отличную линейность даже при очень низких уровнях измеряемого тока. Ферритовые трансформаторы имеют малый фазовый сдвиг между входным и выходным током, что необходимо для точного измерения истинной активной мощности или энергии. Благодаря высокой твердости материала сердечника удается минимизировать воздушные зазоры, кроме того, феррит практически нечувствителен к старению и перепадам температуры (в отличие от FeNi или FeSi).

Последний, но не менее важный факт состоит в том, что все описанные качества ферритов доступны без больших финансовых затрат, что позволяет предлагать разъемные трансформаторы тока с хорошими параметрами по очень привлекательной цене. Для измерения высоких токов необходимы ферритовые сердечники больших габаритов, производство которых связано с некоторыми технологическими ограничениями. В этом случае больше подходят пермаллоевые трансформаторы или катушки Роговского.

Сравнение FeSi, FeNi и ферритовых материалов

Новые ферриты с высокой магнитной проницаемостью не являются оптимальным выбором для неразъемных трансформаторов тока, поэтому мы сосредоточимся на разъемных трансформаторах тока. Большая твердость материала (по этому показателю феррит близок к керамике) позволяет производить тонкую обработку и обеспечивать очень малые воздушные зазоры (менее нескольких микрон), которые сохраняются на протяжении многих лет. У шихтованных магнитных материалов, таких как FeNi или FeSi, величина воздушных промежутков не получается меньше 20–30 мкм, они подвержены старению

и чувствительны к перепадам температуры. Если к преимуществу небольшого зазора феррита добавить лучшую линейность феррита при низких уровнях магнитного возбуждения (то есть при измерении малых токов), то в результате феррит обеспечивает лучшие характеристики, чем у пермаллоя FeNi — 80%, при меньшей стоимости.

На рис. 3(а-в) приведены некоторые результаты моделирования, сравнивающего фазовые сдвиги FeSi, FeNi и феррита с высокой магнитной проницаемостью в 5-А трансформаторе тока.

Фазовый сдвиг у феррита в два раза меньше, чем у пермаллоя, по этому показателю он вне конкуренции. Уменьшенный воздушный зазор ферритового сердечника также обеспечивает более высокую точность коэффициента трансформации (соотношение числа витков первичной и вторичной обмотки).

Катушка Роговского

Катушка Роговского используется в разъемном гибком датчике, имеющем вид петли, которой можно легко обхватить проводник с измеряемым током (рис. 4). Она представляет собой спиральную катушку из провода с отводом от одного конца и проходящим через центр катушки отводом от другого конца, так что оба вывода находятся с одной стороны датчика. Длину петли подбирают в соответствии с диапазоном измеряемых токов, что позволяет обеспечить оптимальные передаточные характеристики.

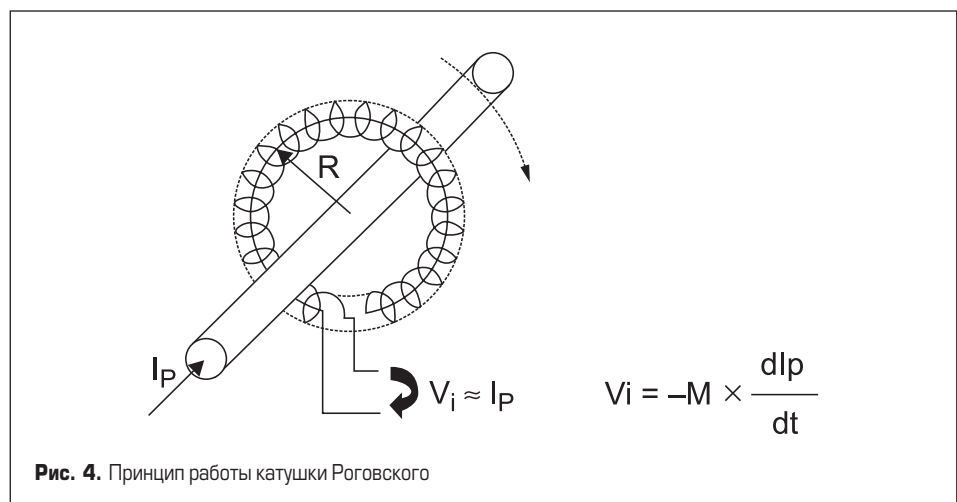
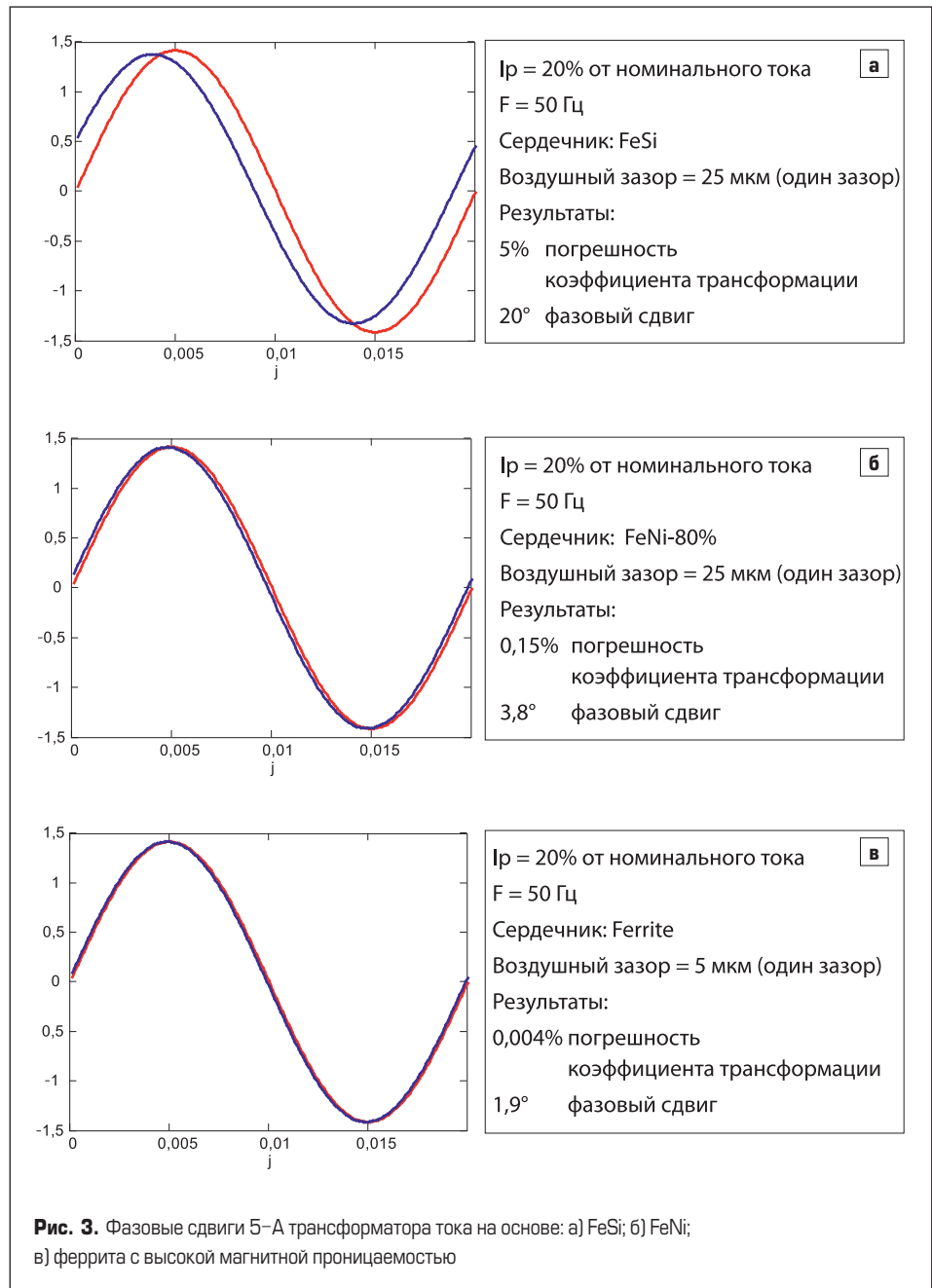
Эта технология предназначена для точного измерения скорости изменения (производной) первичного тока, индуцирующего пропорциональное напряжение на выводах катушки. Для преобразования этого напряжения в выходной сигнал, пропорциональный первичному току, необходимо электронное интегрирующее устройство. Иными словами, с помощью технологии катушки Роговского можно создавать очень точные и линейные датчики тока, но для их работы нужна дополнительная электронная схема и калибровка.

Катушка Роговского имеет меньшую индуктивность, чем трансформатор тока, и, следовательно, лучшие частотные характеристики, что обусловлено отсутствием магнитного сердечника. У нее высокая линейность даже при больших токах, поскольку отсутствует сердечник из железа, который может насыщаться. Таким образом данный тип датчиков особенно хорошо подходит для измерения больших или быстро изменяющихся токов. Еще одним преимуществом, особенно для применения в силовых системах, является малый размер и простота установки, в то время как традиционные трансформаторы тока большие и тяжелые.

Параметры таких датчиков очень сильно зависят от качества изготовления катушки, поскольку для обеспечения высокой устойчивости к электромагнитным помехам необходим равный интервал между витками. Другим важнейшим узлом, влияющим на параметры, является место соединения петли, поскольку

ку точка разрыва петли определяет чувствительность датчика к влиянию внешних проводников, а также к позиции измеряемого токнесущего проводника, находящегося внутри петли. Система фиксации или зажима

должна обеспечивать не только очень точное и воспроизводимое положение выводов катушки, но и высокую симметрию, в то время как один из концов петли подключен к выходному кабелю. Для обеспечения этих требова-



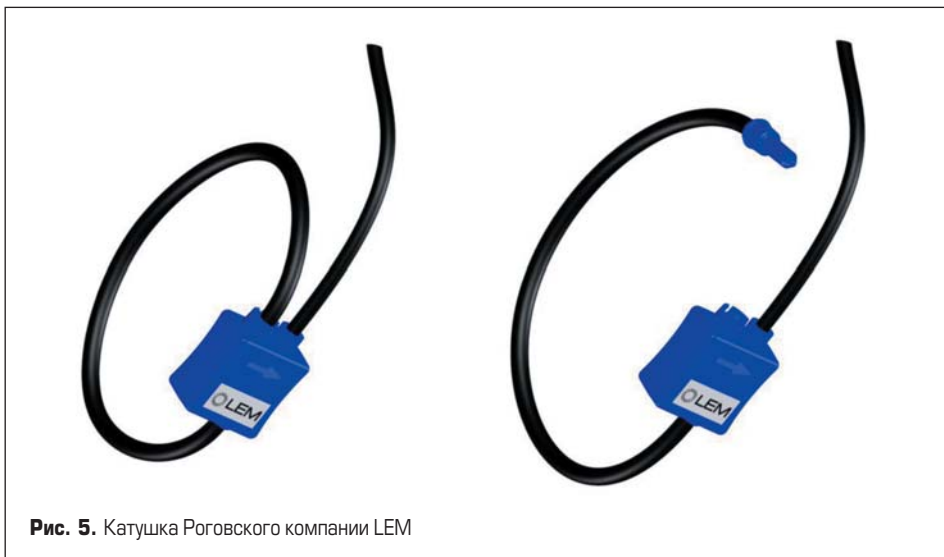


Рис. 5. Катушка Роговского компании LEM

ний недавно разработаны новые технологии, имеющие особые механические и электрические параметры и позволяющие значительно повысить точность и ее нечувствительность к позиции измеряемого проводника внутри петли. Ранее погрешность, обусловленная его положением, составляла около $\pm 3\%$ на частоте 50/60 Гц, в новейших датчиках Роговского (рис. 5) ошибка снижена до $\pm 0,5\%$.

Заключение

В новых установках широко применяются неразъемные трансформаторы тока, и технология датчиков с разъемным сердечником раз-

работана не для конкуренции с ними. Однако неразъемные трансформаторы невозможно использовать для модернизации существующих станков и оборудования без отключения системы и связанных с этим проблем и затрат. Новые материалы и передовые технологии привели к появлению современных трансформаторов тока с разъемным сердечником, предназначенных для быстрой модернизации существующих установок с помощью высокопроизводительных и экономичных систем мониторинга состояния объектов и наблюдения за ними, а также контроля расхода электроэнергии.

Быстро растущий рынок энергосберегающих устройств, внедрение систем контроля

мощности диктуют необходимость разработки высококачественных и экономически эффективных трансформаторов тока с разъемным сердечником.

Такие трансформаторы не являются принципиально новыми, однако традиционные технологии, используемые для их производства, имеют многочисленные недостатки. Для их изготовления нужны дорогостоящие материалы (например, FeNi), или они имеют недостаточно хорошие параметры, особенно по показателям линейности и фазового сдвига (в частности, FeSi). Применение новых типов ферритов с существенно улучшенной магнитной проницаемостью позволяет добиться высоких параметров при доступной цене.

Технология производства катушек Роговского за последнее время была значительно усовершенствована, что позволило выпускать компактные, легкие и гибкие сенсоры для больших токов. Однако их применение требует дополнительной схемы обработки сигнала и калибровки, необходимой для получения наилучших характеристик. Улучшение конструкции и технологии изготовления способствовало снижению стоимости катушек и их чувствительности к позиционированию относительно измеряемого проводника с током. Так удалось преодолеть одну из главных проблем датчиков Роговского, имеющих очень интересные свойства и большой потенциал.

В последнее время многообразие технологий позволяет решать самые разные задачи в новых появившихся в большом количестве приложениях, для которых чрезвычайно важны стоимость и экологические аспекты. ■