

Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики

В.Д. ЛЕБЕДЕВ, Г.А.ФИЛАТОВА, А.Е. НЕСТЕРИХИН
Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ)
Россия
vd_lebedev@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Измерительный преобразователь тока, пояс роговского, гальваномагнитный преобразователь, магнитотранзистор

1. ВВЕДЕНИЕ

Работы в области создания цифровых подстанций, сетей SMART GRID, реализации протокола МЭК 61850-9-2 не только предъявляют все более высокие требования к первичным преобразователям тока (трансформаторам тока), но открывают возможности использования принципов измерений не получивших широкого распространения до настоящего времени в большой энергетике.

Несмотря на столетний опыт в области создания и эксплуатации электромагнитных трансформаторов тока, и учитывая то, что они являются основными первичными преобразователями для целей релейной защиты и автоматики, полностью устранить недостатки присущие к трансформаторам не удалось. Одним из существенных недостатков трансформатора является насыщение магнитопровода во время коротких замыканий, сопровождающихся апериодической составляющей. Использование разомкнутых магнитопроводов снижает насыщение, но и при прочих равных условиях снижает точность, как по току так и по углу. К настоящему времени выполнены масштабные исследования по применению электромагнитных трансформаторов для релейной защиты, в том числе, отраженные в публикациях таких как [1-4].

В настоящее время активно рекламируются оптические трансформаторы тока на эффекте Фарадея [5-7]. Несмотря на то, что разработки по созданию оптических трансформаторов ведутся более 40 лет [2], первые промышленные образцы появившиеся в последние годы слишком дороги и могут найти применение на высоком и сверхвысоком напряжении (220 кВ и более).

Расположение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики в непосредственной близости с измерительными преобразователями, а также создание электронных трансформаторов открывает возможности использования первичных преобразователей на других физических принципах, например в реклоузерах производства "Таврида Электрик" используются преобразователи на основе поясов Роговского [8].

Практический интерес также представляет измерительное преобразование тока на основе гальваномагнитных эффектов, используемых в датчиках магнитного поля, позволяющих измерять не только переменный, но постоянный ток, а также переменный ток сопровождающийся медленно затухающими апериодическими составляющими. Измеряемый ток создает магнитное поле на которое и реагирует датчик. К гальваномагнитным преобразователям относятся датчики Холла, магниторезисторы, магнитнодиоды и магнитотранзисторы. Наибольшие перспективы для измерения токов для целей релейной защиты имеют магнитотранзисторы, обладающие линейностью, температурной стабильностью широким частотным диапазоном.

Таким образом, актуален выбор наиболее перспективных видов первичных преобразователей измерения тока для энергетики.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Конкретные виды реализации первичных преобразователей.

На протяжении долгого времени в электроэнергетике традиционно в качестве основных первичных преобразователей для нужд релейной защиты и автоматики использовались электромагнитные трансформаторы тока. В настоящее время эта тенденция продолжается, однако сейчас активно разрабатываются измерительные преобразователи на абсолютно новых принципах, которые в ближайшем будущем будут способны потеснить трансформаторы тока с их позиций.

На современном этапе развития электроэнергетики при повсеместном использовании электрооборудования и электроприборов наиболее актуальным является достоверное измерение силы тока для обеспечения высокой надежности и безопасности промышленных систем и сетей. Для осуществления мониторинга и диагностики цепей, запуска схем защиты, обнаружения отказов электрооборудования и аварийных состояний различных типов нагрузки применяются различные типы преобразователей тока. Достоинства и недостатки различных типов преобразователей тока определяют области их применения.

Современные преобразователи тока подразделяются на следующие типы:

- трансформаторы тока;
- резистивные преобразователи (токовые шунты);
- преобразователи тока на гальваномагнитных эффектах (выполненных на основе датчиков Холла, магниторезисторов, магнитодиодов, магнитотранзисторов);
- волоконно-оптические преобразователи тока на эффекте Фарадея;
- пояс Роговского.

Традиционные трансформаторы тока.

Традиционные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) применяются в энергетике на всех напряжениях от 6 кВ до 1150 кВ и обеспечивают на станциях и подстанциях информацией о первичном токе и первичном напряжении все системы управления и учета электроэнергии, такие как системы измерения, АСКУЭ, РЗА, ПА и диспетчеризации.

Среди требований, предъявляемых к высоковольтным трансформаторам тока и напряжения, выделим главные:

- точность измерения первичного тока и напряжения (обычно для различных потребителей вторичных токов и напряжений точность разная).
- электробезопасность персонала и вторичных цепей всех систем на щите управления станцией или подстанцией, т.е. обеспечение высоковольтной изоляции между первичными и вторичными цепями ТТ и ТН;

Эти требования определяют конструкции электромагнитных ТТ и ТН.

Высоковольтные трансформаторы тока имеют следующие достоинства и недостатки.

Достоинства:

1. Высокий класс точности – 0,2–0,5S. В лабораторных ТТ, где нет высоковольтной изоляции, достижим класс точности 0,1S и выше.
2. Простота и надежность ТТ в сетях 6–10–35 кВ.
3. Температурная стабильность характеристик ТТ.

Недостатки:

1. Насыщение магнитопровода электромагнитного ТТ аperiodической составляющей тока короткого замыкания (КЗ) и отсутствие передачи информации о первичном токе в первые периоды аварийного переходного процесса, когда эта информация наиболее необходима системам РЗА и ПА для успешной локализации и ликвидации аварии (погрешности трансформации тока электромагнитными ТТ достигают в этом режиме 90 %).
2. Высокая аварийность из-за проблем с изоляцией.
3. Взрыво- и пожароопасность трансформаторов с масляной изоляцией (взрывоопасность в элегазовых ТТ сохраняется).

Несимметричное искажение формы кривой вторичного тока ТТ под действием аperiodической составляющей в первичном токе КЗ имеет важных следствия:

1. Информация о первичном токе фактически перестает поступать по вторичным цепям на системы РЗА и ПА через 10 миллисекунд после начала аварии, причем сильно искажена не только апериодическая составляющая тока КЗ, но и периодическая тоже, примерно на 90% во втором периоде (через 5–10 периодов (100–200 миллисекунд) трансформация первичного тока восстановится).

2. В этих условиях системы релейной защиты должны выделить самое начало переходного процесса и по производной первой четверти периода предсказать форму кривой тока КЗ, в противном случае устройства релейной защиты (и микропроцессорные и старые) либо не работают, либо работают ложно, либо просто затягивают процесс до появления информации, хотя по регламенту системы РЗА должны за один–два периода определять место аварии и выдавать команды на соответствующие высоковольтные выключатели для локализации и ликвидации аварии в начальной стадии.

3. Затягивание ликвидации аварии чревато выпадением из синхронизма крупных электрических двигателей и генераторов на заводах и электростанциях, что превращает простую аварию в системную.

Поскольку насыщение магнитопровода ТТ апериодической составляющей тока КЗ вытекает из физического принципа действия трансформатора (постоянный ток не трансформируется), этот недостаток исправлен быть не может.

Задача создания новых ТТ успешно решается и на основе электромагнитного принципа. Можно предполагать, что и после промышленного освоения ТТ, использующих другие принципы, электромагнитные ТТ, предназначенные для работы в переходных режимах, будут иметь свои предпочтительные области применения, определяемые некоторыми их качествами (простотой и опытом эксплуатации, большой отдаваемой мощностью).

Методы улучшения работы электромагнитных ТТ в переходных режимах можно несколько условно разделить на четыре группы, в основу которых положены следующие способы ограничения погрешностей:

- 1) создание путей для апериодической составляющей первичного тока помимо ветви намагничивания ТТ;
- 2) увеличение магнитной проницаемости магнитопровода в режиме насыщения;
- 3) устранение или снижение остаточной индукции в магнитопроводе;
- 4) ограничение максимальной рабочей индукции в магнитопроводе ТТ и уменьшение магнитной проницаемости.

ТТ с сердечником из нанокристаллического железа.

ТТ на сердечниках из нанокристаллических сплавов имеют перед ТТ на сердечниках из электротехнической стали следующие преимущества:

- 1) устойчивость метрологических характеристик к намагничиванию постоянным током,
- 2) уменьшенные в 4-10 раз потери на вихревые токи и перемагничивание сердечника,
- 3) повышенный (двойной) технологический запас по классу точности,
- 4) более длительный срок службы с сохранением метрологических характеристик (и, тем самым, потенциально больший межповерочный интервал),
- 5) меньшие затраты материала на сердечник и медь, меньшие габариты, вес сердечника и вес ТТ в целом.

Указанные преимущества ТТ с нанокристаллическими сердечниками делают их более перспективными для применения в качестве основных систем контроля и учета электроэнергии (АИИС КУЭ), однако сердечники магнитопроводов из нанокристаллического материала также подвержены насыщению, что ограничивает их использование для целей релейной защиты.

Оптические трансформаторы тока на эффекте Фарадея.

Они содержат оптоволоконный преобразователь в виде катушки с оптическим волокном надетой на токопровод. При протекании тока вокруг проводника возникает магнитное поле, которое оказывает влияние на поляризацию двух поляризованных световых сигналов с противоположным направлением вращения, проходящих по волокну. Изменение поляризации вернувшихся световых сигналов позволяет вычислить угол Фарадея, который прямо пропорционален току в первичной цепи. Одним из ключевых и, соответственно, неотъемлемых

элементов системы измерения является блок электроники, который производит формирование световых сигналов и дальнейшую их обработку для вычисления тока. По сути, ТТ становится активным элементом системы вторичной коммутации, поскольку не может функционировать без упомянутого блока, требующего надежного электропитания.

Собственная стоимость оптических ТТ в несколько раз превышает стоимость традиционных электромагнитных, в том числе за счет использования дополнительных блоков электроники. Затраты на инжиниринг, которые согласно предполагаемой концепции цифровой подстанции должны сократиться, прогнозируются как достаточно высокие.

Данные измерительные преобразователи имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными электромагнитными ТТ. Эти достоинства широко рассмотрены в публикациях [9 - 12].

Среди них:

- широкий диапазон снимаемых данных;
- отсутствием явлений гистерезиса, магнитного насыщения и остаточного намагничивания;
- возможность интеграции в измерительные и информационные системы с использованием различных интерфейсов – аналоговых, дискретных и цифровых
- полная эколого-, пожаро-, взрыво- и электробезопасность
- высокая помехоустойчивость
- долговечность
- малые габаритные параметры

Однако данный принцип измерения не лишен недостатков. Сам по себе эффект Фарадея является косвенным, так как не проявляется в вакууме и зависит от свойств среды, что приводит к погрешности обусловленной изменением температуры, механических напряжений и вибрации оптического волокна. Следует отметить, что на текущий момент практически отсутствует опыт эксплуатации таких преобразователей.

Преобразователи на основе поясов Роговского.

В последнее время как для релейной защиты так и для измерений начинают применять преобразователи на основе поясов Роговского, .

Их основные преимущества заключаются в следующем:

- высокая точность измерения (не более 0,1 %);
- широкий диапазон измерений (от нескольких ампер до сотен килоампер) и измерение тока с большой апериодической составляющей (ввиду отсутствия насыщающегося сердечника);
- широкий частотный диапазон до 1 МГц и более;
- незначительные габаритные размеры, что позволяет интегрировать катушки, например, в коммутационное оборудование и малогабаритные распределительные устройства;
- гальваническая развязка с первичной цепью, что исключает образование опасного для жизни уровня напряжения на вторичных выводах;
- отсутствие необходимости выполнения поверки;
- отсутствие необходимости обеспечения оперативным питанием и низкая стоимость.

Совокупность этих преимуществ предоставляет возможность эффективного применения данных средств измерения с микропроцессорными устройствами РЗА (например [12, 13]):

- повышается надежность срабатывания устройств РЗА в режимах, когда это необходимо, и надежность несрабатывания в режимах без внутреннего КЗ (для защит с абсолютной селективностью);
- повышается селективность и быстродействие работы устройств РЗА;
- значительно сокращается число уставок задания для сложных типов защиты;
- обеспечивается возможность сочетания в одном устройстве помимо функций РЗА функций учета электроэнергии.

Магнитотранзисторные преобразователи тока.

Для измерения токов на основе гальваномагнитных эффектов в настоящее время широкое распространение получили датчики Холла, используемые в измерительных токовых преобразователях применяемых в схемах управления электродвигателями. Чаще всего на датчиках Холла создаются преобразователи тока компенсационного типа, когда датчик Холла в качестве нуля-индикатора устанавливается в зазоре магнитопровода с компенсационной обмоткой. Главным недостатком такого решения является сложность реализации измерения больших токов короткого замыкания, обеспечивая большой ток в компенсирующей обмотке.

Магниторезисторы и магнитодиоды не нашли широкого применения для измерения токов, так как первые реагируют на модуль магнитного поля, а вторые имеют нелинейности существенно ограничивающие область применения.

Большие перспективы для измерения токов для целей релейной защиты имеют магнитотранзисторы [15]. Остановимся на них подробнее.

Магнитотранзистор представляет собой биполярный транзистор, конструкция и рабочий режим которого оптимизированы для получения максимальной чувствительности коллекторного тока I_K к магнитному полю. Они бывают как с вертикальной, так и с горизонтальной структурой (соответственно ВМТ и ГМТ). Полезный сигнал проявляется в коллекторном токе при воздействии на МТ магнитным полем. Наибольший интерес представляют транзисторы латеральные магнитотранзисторы с дифференциальной структурой, у них полезным сигналом является разность коллекторных токов (рис. 1.)

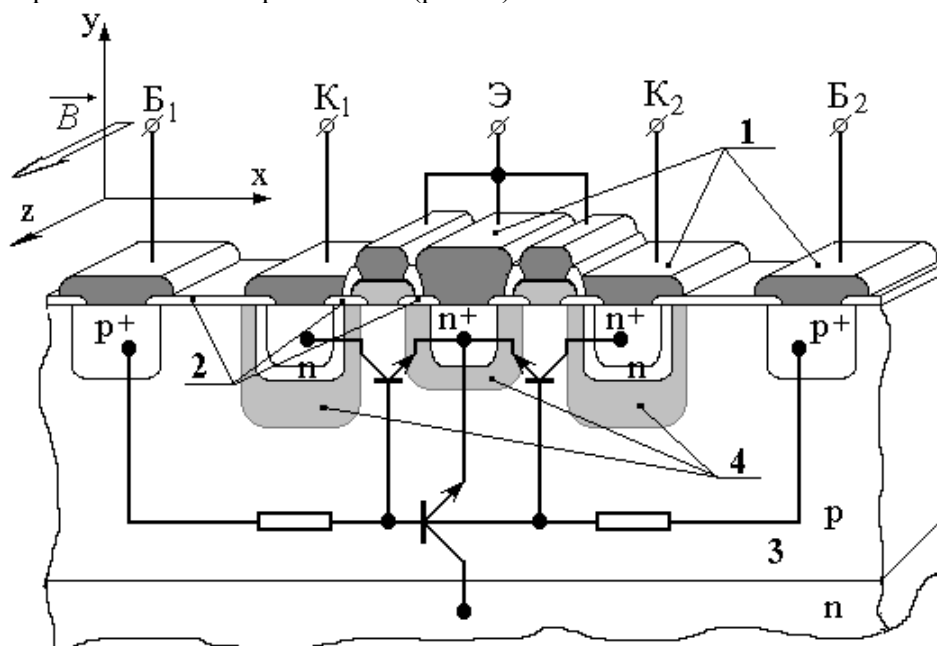


Рис.1. Структура магнитотранзистора (1 - металлические электроды эмиттера, первого и второго коллекторов, первой и второй базы; 2 - поверхностная изоляционная пленка оксида кремния, 3 - p-типа в теле кремниевой пластины n-типа; 4 - p-n переходы сформированные под электродами.

Ось магнитной чувствительности расположена параллельно поверхности кремниевой пластины, вдоль p-n переходов, а не перпендикулярно как в датчике Холла. Наложение внешнего магнитного поля, характеризующегося вектором магнитной индукции B , приводит к нарушению симметрии обмена зарядами. Физикой указанных явлений является сила Лоренца, действие которой обнаруживается по ряду гальванических эффектов таких как: эффект Суля (действие силы Лоренца на неосновные носители заряда), эффект Холла (действие силы Лоренца на основные носители заряда), магнитоконцентрационный эффект Холла (действие силы Лоренца на носители обоих типов), эффект магнитного сопротивления, магнитодиодный эффект. В зависимости от параметров в той или иной степени может проявляться тот или иной эффект.

Для измерений токов важно использовать транзисторы с высокой линейностью, малым уровнем шумов, низким температурным дрейфом. В настоящее время имеются разработки транзисторов, обладающие указанными качествами достаточные для измерения токов с точностью 0,5 - 5 % при использовании несложной схемы стабилизации режима, в широком температурном диапазоне эксплуатации магнитотранзисторов.

При организации измерения токов по магнитному полю с помощью магнитотранзисторов важно соблюдать условия, чтобы магнитные поля соседних токопроводов не влияли на точность измерений. Для исключения влияния соседних токов лучше всего использовать магнитотранзисторы, установленные в кольцо вокруг провода с током с реализацией закона полного тока (первого уравнения Максвелла), согласно которому циркуляция вектора напряженности магнитного поля равна току охватываемому контуром: $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = i$. Расположение

достаточного количества магнитотранзисторов по контуру позволит осуществить дискретную реализацию закона полного тока. Таким образом всегда можно обеспечить измерение тока с заданной методической погрешностью используя конечное число магнитотранзисторов. Коллекторы магнитотранзисторов, в которых проявляется магниточувствительность работают в режиме близком к источнику тока, позволяя тем самым включать параллельно необходимое количество транзисторов, объединяя коллекторы и суммируя полезный сигнал и при этом реализуя закон полного тока. Данная особенность существенно отличает магнитотранзистор от датчика Холла, в котором магниточувствительные электроды работают в режиме источника ЭДС и не позволяют их объединять, суммирование же сигналов последовательным соединением, потребует гальванической развязки по питанию, что существенно усложняет схему.

В ИГЭУ выполнен ряд исследовательских работ по исследованию разработке и созданию экспериментальных образцов измерительных преобразователей тока на магнитотранзисторах. Результаты экспериментальных исследований демонстрируют точную работу магнитотранзисторного преобразователя не только в установившихся, но и переходных режимах. Так на рис. 2 представлены результаты испытаний магнитотранзисторного преобразователя при токе КЗ с апериодической составляющей, оба графика (входной ток и выходной сигнал практически совпадают).

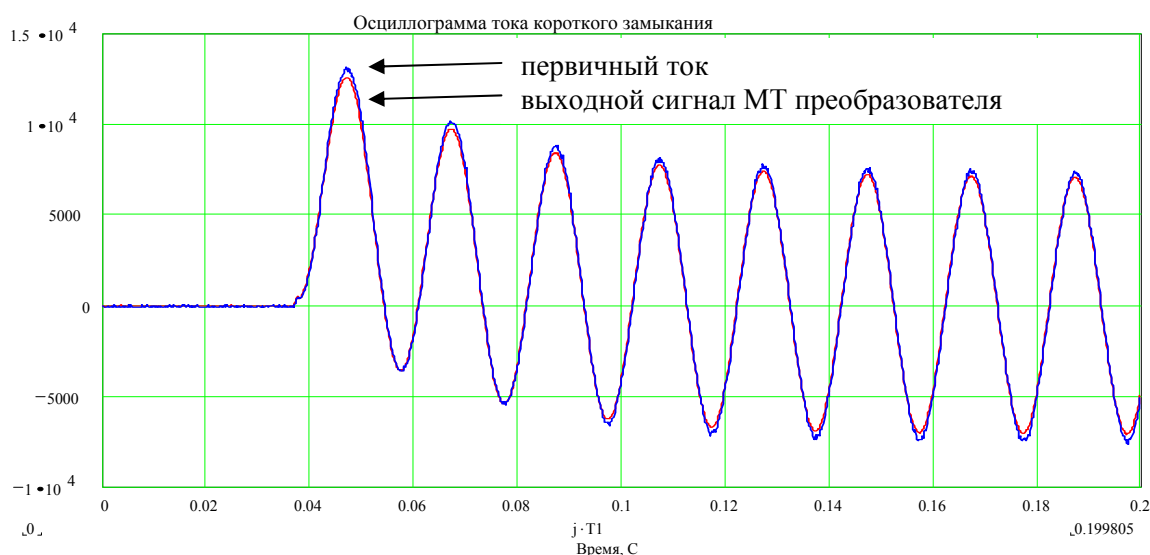


Рис.2. Осциллограмма тока короткого замыкания с апериодической составляющей, и выходного сигнала магнитотранзисторного преобразователя

В настоящее время алгоритмы релейной защиты не учитывают информацию заложенную в апериодической составляющей, так как она практически не трансформировалась в классических электромагнитных трансформаторах тока. Введение преобразователей тока, позволяющих трансформировать токи в широком спектре частот, включая постоянную составляющую

открывает еще одну информационную составляющую (апериодическую) для учета в алгоритмах релейной защиты и автоматики. Так, например, постоянная времени, заложенная в апериодическую составляющую, говорит о соотношении активного и реактивного сопротивлений в цепи короткого замыкания, что позволит более точно определить место КЗ и локализовать аварию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казанский В.Е. Измерительные преобразователи тока в релейной защите. - М.: Энергоатомиздат, 1988. -240 с.
2. Трансформаторы тока/ В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель, И.М. Сирота, Б.С. Стогний. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. - 416 с.
3. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. Королев Е.П., Либерзон Э.М. - М. Энергия 1980. - 207 с.
4. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. – Перевод с англ./Под ред. Дьякова А. Ф. – М.: Знак, 2008. – 216 с.
5. www.profotech.ru Волоконно-оптические трансформаторы тока и напряжения.
6. <http://www.alstom.com/russia/ru/activities/energy-transmissions/grid-in-russia/automation-solutions/protection-relays/-iec-61850-92>
7. <http://pro-ln.ru/ru/index.html>
8. <http://www.tavrida.ru/>
9. A. P Steer, S. J. Turner, P. R. B. Farrie, R. P Tatam, A. N. Tobin, J. D. C. Jones, D. A. Jackson, "Optical fiber current sensor for circuit protection," in Proc. IEEE Fourth International Conf. Developments in Power Protection, 1989, pp. 296-300.
10. T. Sawa, K. Kurosawa, T. Kaminishi, T. Yokota, "Development of optical instrument transformers," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, pp.884-891, April 1990.
11. Y. C. L. Frankie, C. K. C. Wilson, M. S. Demokan, "Fiber-optic current sensor developed for power system measurement," in Proc. International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM), 1991, pp. 637-643.
12. C. Qingqian, H. Hou, D. You, Y. Xianggen, Y. Zhandong, "Research on improvements of using electronic current transformer on distance protection," in Proc. IEEE 42nd International Conf. Universities Power Engineering, Brighton, 2007, pp. 267-272.
13. Lj. A. Kojovic, "Integration of Protection, Control, and Metering Functions" 21, rue d'Artois, F-75008 PARIS B5-112 CIGRE 2012.
14. Lj. A. Kojovic, "Innovative Non-conventional Current Transformers for Advanced Substation Designs and Improved Power System Performance", 42nd CIGRE Session 2008, Paris, France, 2008.
15. Лебедев В.Д. Разработка магнитотранзисторных датчиков тока для систем защиты и измерений - автореферат диссертации на соиск. ученой степени канд. техн. наук, Иваново 1997, 19 с.