

Оптоэлектронные трансформаторы: панацея или частное решение частных проблем?

В.И. Гуревич, начальник сектора Центральной лаборатории Электрической компании Израиля, канд. техн. наук

Уже не первый десяток лет во многих странах мира разрабатываются трансформаторы напряжения (ТН) и тока (ТТ) оптоэлектронного типа (рис. 1) основанные на использовании электрооптических эффектов Керра и Пекельса (для измерения напряжения) и магнитооптического эффекта Фарадея (для измерения тока).

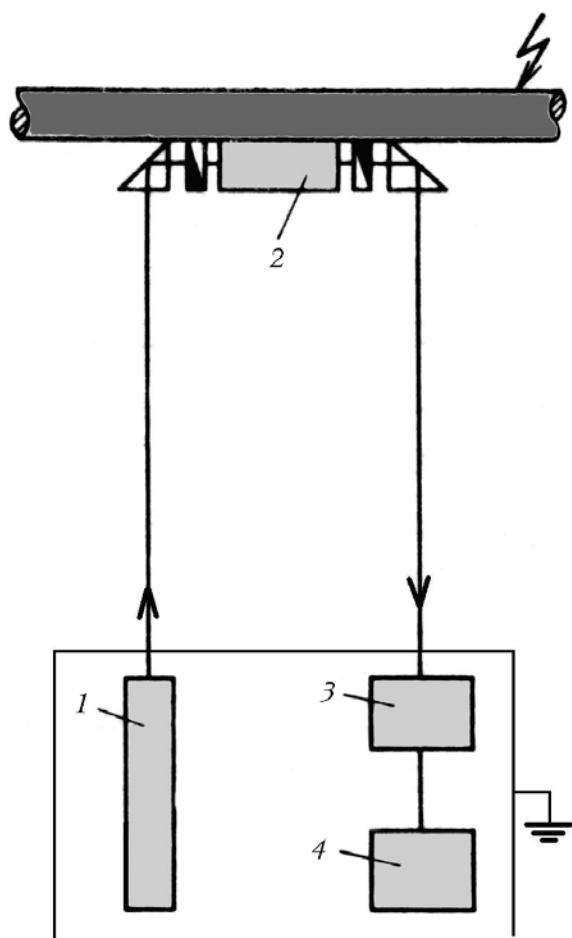


Рис. 1. Принцип построения оптоэлектронного измерительного трансформатора: 1 — источник поляризованного света; 2 — электрооптический преобразователь; 3 — анализатор света; 4 — фотопреобразователь и усилитель с выходным исполнительным элементом

В трансформаторах напряжения с ячейками Керра или Поккельса (рис. 2) световой поток модулируется электрическим полем в активном мате-

риале, расположенном между электродами, к которым приложено измеряемое напряжение. Эффект Керра возникает во многих изотропных веществах (бензол, эпоксидные компаунды и др.), но наиболее часто используется нитробензол, проявляющий наибольший эффект. Линейный электрооптический эффект Поккельса наблюдается в пьезоэлектрических кристаллах, помещенных в электрическое поле. Сильнее всего этот эффект проявляется в кристаллах дигидрофосфата аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) и гидрофосфата калия (KH_2PO_4) в продольном электрическом поле, создаваемом с помощью кольцевых электродов.

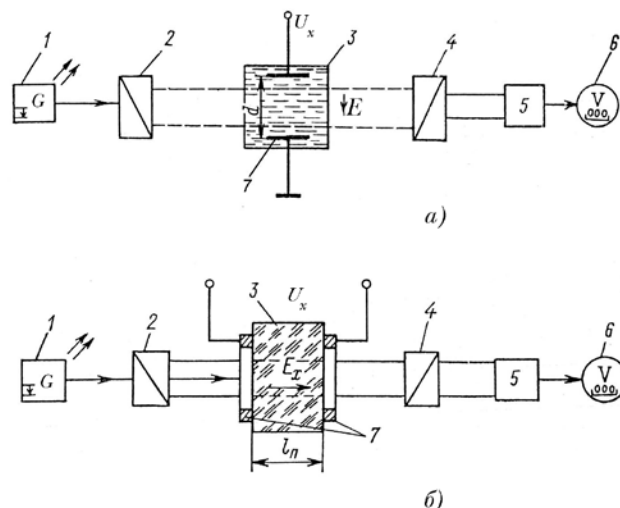


Рис. 2. Электрооптические преобразователи Керра (а) и Поккельса (б): 1 — источник света; 2 — поляризатор света; 3 — активный материал; 4 — анализатор поляризации; 5 — фотоприемник; 6 — выходной элемент; 7 — электроды, к которым приложено измеряемое напряжение

В оптоэлектронных ТТ используется эффект Фарадея (рис. 3), заключающийся во вращении плоскости поляризации линейно поляризованного света в оптически активном веществе под действием внешнего магнитного поля. Измеряя угол поворота плоскости поляризации света можно определить индукцию магнитного поля или силу тока, если преобразователь поместить в магнитном поле измеряемого тока.

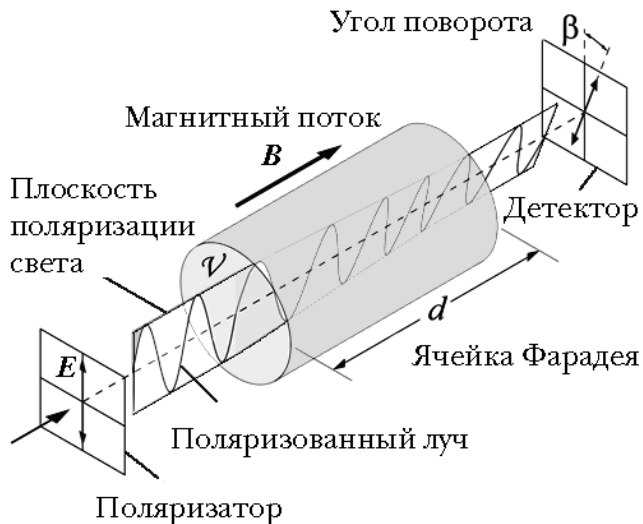


Рис. 3. Магнитооптический преобразователь на основе эффекта Фарадея

Угол поворота плоскости поляризации света, рад., определяется следующим соотношением:

$$\beta = vBd,$$

где B — плотность магнитного потока, Тл; d — длина части ячейки Фарадея, взаимодействующей с магнитным потоком, м; v — константа Вердета для данного материала ячейки Фарадея.

В качестве рабочего вещества в магнитооптических преобразователях используют стекла, содержащее оксид свинца (так называемые флинты, кроны), а также плавленный кварц.

Особенно большую чувствительность к магнитному полю имеют пленки из феррита граната. В этом устройстве (см. рис. 1) поляризованный луч с заземленного источника поступает по оптическому волокну или по световоду другого типа на ячейку Фарадея, расположенную непосредственно на высоком потенциале.

В этой оптической ячейке световой поток меняет свой вектор поляризации в зависимости от воздействующего на нее магнитного потока (пропорционального току в высоковольтной цепи) (см. рис. 3).

Далее, промодулированный таким образом световой луч возвращается на потенциал земли, где преобразуется в электрический сигнал (см. рис. 1).

Разработкой устройств такого рода занимаются уже лет 30–40. И только сравнительно недавно на рынке появились оптические трансформаторы тока (рис. 4).

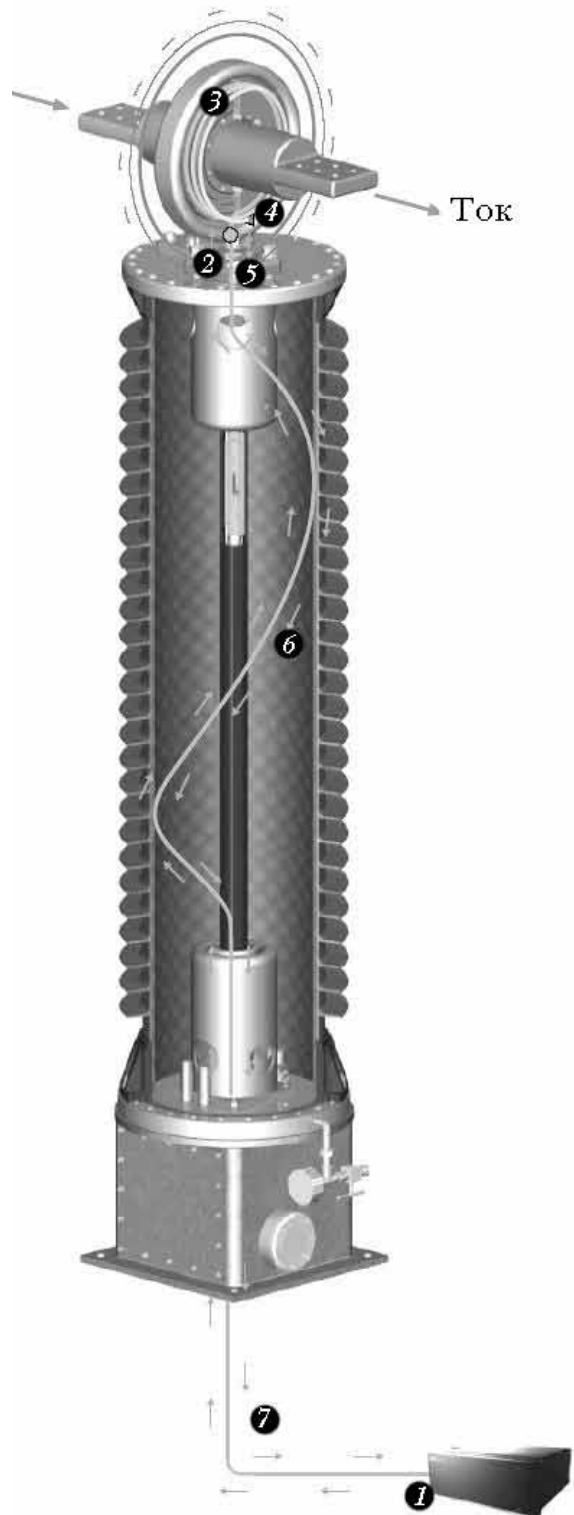


Рис. 4. Магнитооптический трансформатор тока, предлагаемый компанией NxtPhase (США)

Чувствительный элемент ТТ установлен на полимерной изоляционной колонке, снабженной поддерживающим изолятором, обеспечивающим

спуск гибкого световода на землю. Преобразователь 1 входного сигнала в два линейно поляризованных сигнала, которые поступают по оптоволокну, сохраняя поляризацию, на измерительную головку, выполнен на базе светоизлучающего диода.

Круговой поляризатор 2 наверху изоляционной колонки (опорного изолятора) преобразует два линейно поляризованных световых сигнала в сигналы с круговой поляризацией левого и правую вращения. Световые сигналы 3 многократно обходят проводник.

Магнитное поле, создаваемое током, протекающим в высоковольтном проводнике, замедляет один сигнал и ускоряет другой (эффект Фарадея). Когда сигналы с круговой поляризацией проходят весь путь вокруг проводника, они отражаются зеркалом 4 и направляются в обратный путь. Направление их поляризации теперь обратно первоначальному. На обратном пути эффект удваивается. После этого оба сигнала возвращаются обратно на круговой поляризатор, который снова преобразует их в линейно поляризованные световые пучки.

Свет поступает обратно на оптоэлектронный блок внизу колонки по оптическому волокну 6. Разница в скорости распространения этих двух оптических сигналов обуславливает сдвиг по фазе между ними. Поскольку оба сигнала распространяются по идентичным путям, вибрация и изменение температуры воздействуют на них одинаково и поэтому не влияют на точность измерения тока.

На таком же принципе работает и первый российский образец оптоэлектронного ТТ, разработанный ООО Научно-производственная компания «Оптолинк» совместно с ОАО Раменский электротехнический завод «Энергия» (рис. 5).

В последнее время в многочисленных публикациях (см. например, статью **А. Гуртовцева** «Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Принципы работы, устройство, характеристики» в журнале «Новости электротехники», № 5, 2009) появились хвалебные оды в честь оптоэлектронных трансформаторов тока, представляющих их чуть ли не панацеей от все бед и проблем электроэнергетики. Но традиционные трансформаторы тока верой и правдой служат электроэнергетике уже более сотни лет. Это один из самых простых, самых надежных, самых стабильных и самых безпроблемных элементов в электроэнергетике. Поэтому, когда заходит речь о принципиально новых устройствах и призывах заменить ими традиционные, нужны очень веские аргументы в пользу новых устройств. Есть ли такие аргументы у апологетов оптоэлектронных ТТ? Могут ли их заменить чисто рекламные заявления публикуемые, обычно ими? Судите сами:

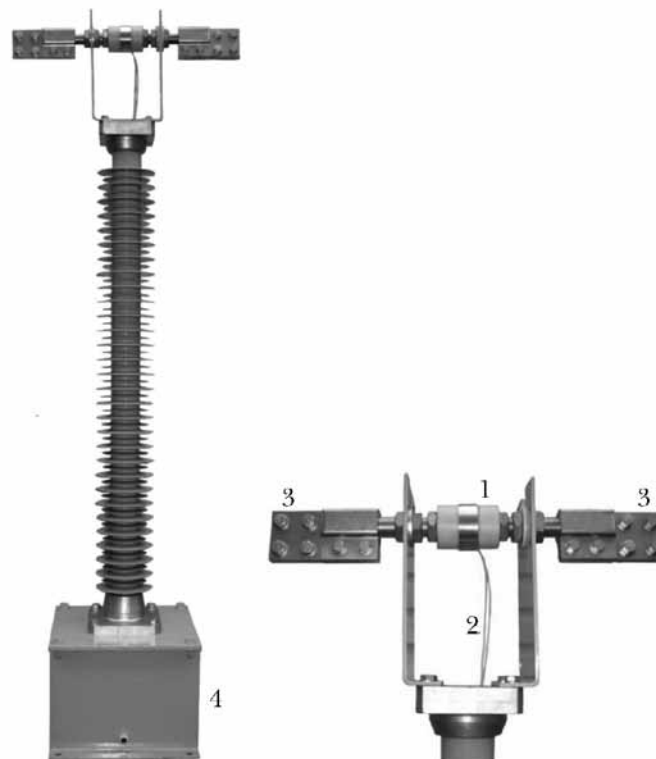


Рис. 5. Первый российский оптоэлектронный измерительный трансформатор тока типа ОИЦТТ 110кВ, 2кА, 0,2с: 1 — ячейка Фарадея; 2 — оптическое волокно; 3 — токовые выводы; 4 — электронный преобразователь

«Широкая полоса пропускания сигналов (не менее 6 кГц), позволяющая производить полный анализ не только количества, но и качества электроэнергии в части гармоник (до 100 гармоник) и переходных процессов (для защиты)».

Вопрос: А разве полоса пропускания обычных ТТ недостаточна для «полного анализа не только количества, но и качества электроэнергии в части гармоник (до 100 гармоник) и переходных процессов (для защиты)»? Разве аварийные переходные процессы в сетях сегодня не записываются цифровыми регистраторами? Как показано в ряде исследований, выполненных различными авторами, частотные характеристики самых обычных ТТ простираются до частот в 100 кГц [1, 2]. То есть получается, что частотные характеристики обычных ТТ даже лучше, чем оптоэлектронных.

«Высокая помехоустойчивость к электромагнитным помехам, позволяющая монтировать изделия в сложной электромагнитной обстановке без ее предварительного анализа и коррекции».

Вопрос: высокая помехоустойчивость по сравнению с чем? С традиционными ТТ? А что, разве с этим есть проблемы? На основании каких таких данных утверждается о высокой помехоустойчивости оптоэлектронных ТТ, содержащих весьма

сложные микропроцессорные преобразователи электрических сигналов в оптические и обратно, которые, как и все устройства такого рода обладают весьма ограниченной помехоустойчивостью?

«Долговечность, долговременная стабильность и высокая повторяемость метрологических параметров изделий».

Вопрос: а разве традиционные ТТ не обеспечивают надлежащую долговечность, стабильность и повторяемость результатов, достаточную для нужд измерения тока и работы релейной защиты? Кто-нибудь проводил сравнительные испытания на надежность и стабильность параметров традиционных и оптоэлектронных ТТ с их сложными электронными блоками?

«Низкая восприимчивость к вибрациям и изменениям температуры».

Вопрос: разве традиционные ТТ восприимчивы к вибрациям и изменениям температуры? Разве оптические волокна и сложные микропроцессорные системы более устойчивы к вибрациям и изменениям температуры, чем медные обмотки, намотанные на железной болванке?

«Простота и надежность конструкции, высокая надежность и самодиагностика электронно-оптических блоков минимизируют требования к техническому обслуживанию и проверке изделий».

Вопрос: с каких это пор сложная оптическая система, снабженная сложным электронным микропроцессорным блоком стала более простой, чем медная обмотка на железе? По какой это теории сложнейшая электронная система оказалась более надежной, чем медная обмотка на железном сердечнике? Необходимость самодиагностики электронной системы — это скорее отрицательное качество, чем положительное, так как это показатель того, что без постоянной самодиагностики система не способна обеспечить высокую надежность.

«Отсутствие насыщения трансформатора».

Вопрос: а разве сегодня при выборе ТТ для релейной защиты не учитываются максимальные токи короткого замыкания в данной линии? А разве в реальных высоковольтных линиях электропередачи класса 110 кВ и выше (для которых и рассчитаны оптоэлектронные ТТ) могут быть такие токи короткого замыкания, что они смогут вызвать сильное насыщение ТТ с номинальным током, например, 1200 А?

«Снижение затрат на эксплуатационное обслуживание по сравнению с элегазовыми и маслонаполненными изоляторами».

Вопрос: какое такое специальное «эксплуатационное обслуживание» требуют маслонаполненные, а тем более элегазовые ТТ? Почему не будет

требовать обслуживания сложное электронное устройство?

Мы не видим четких и однозначных ответов на поставленные вопросы, хотя, конечно, совершенно очевидно, что оптоэлектронные ТТ действительно имеют определенные преимущества, например, в области сверхвысоких напряжений, когда стоимость изоляции традиционного ТТ получается очень высокой. Или в области специальных применений с очень значительными кратностями токов, когда обычные ТТ могут насыщаться. Что же касается якобы особо высокой помехоустойчивости оптоэлектронных ТТ, то это вызывает серьезное сомнение.

Так, недавно, после неприятного инцидента с системой FOCUS (Fiber Optic Communication for Utility Systems), используемой для преобразования электрических сигналов в оптические, их передачи через оптический кабель и восстановления электрических сигналов из оптических в конце оптического кабеля, мы вынуждены были проверить эту систему на соответствие стандартам группы IEC-60255: 60255-22-1, 60255-22-3, 60255-22-4, 60255-5, 60255-6, 60255-11. Эти стандарты описывают требования электромагнитной совместимости (ЭМС) к устройствам релейной защиты (система FOCUS используется для передачи команд между реле защиты и поэтому рассматривается как часть релейной защиты).

В процессе испытаний (рис. 6), мы были неприятно удивлены, обнаружив, что система не отвечает требованиям большинства указанных выше стандартов и, следовательно, не может обеспечить надежное функционирование релейной защиты при воздействии электромагнитных возмущений. В частности, функционирование системы было нарушено и связь между двумя комплектами системы FOCUS полностью потеряна при воздействии стандартных импульсов высокого напряжения между полюсами порта питания (230 В) и корпусом, между портами логических входов и корпусом. При некоторых типах испытаний наблюдался сброс уставок, записанных в памяти, что потребовало ручного введения уставок через компьютер. А при испытании электрической прочности изоляции входов относительно заземленного корпуса одноминутным напряжением 2 кВ переменного тока при плавном его подъеме, уже при напряжении 1130 В произошел пробой внутренних цепей, сопровождающийся обильным выделением дыма.

Таким образом, оптоэлектронная система, предназначенная для повышения помехоустойчивости релейной защиты, сама по себе является элементом крайне не надежным в плане устойчивости к электромагнитным воздействиям.

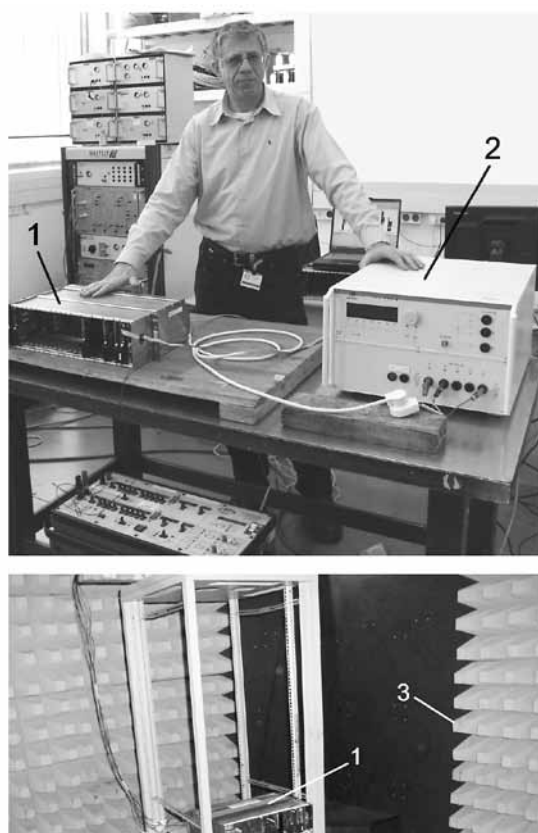


Рис. 6. Испытание автором оптоэлектронной системы FOCUS на соответствие стандартам по электромагнитной совместимости: 1 — один из двух модулей системы FOCUS; 2 — источник стандартных высоковольтных импульсов; 3 — радиопоглощающее покрытие в так называемой безэховой камере (Anechoic Chamber)

Приведенные выше результаты испытаний являются весьма ярким примером того, что сложные микропроцессорные оптоэлектронные системы вовсе не являются верхом совершенства. Поэтому и оптоэлектронные ТТ, по нашему мнению, вовсе не являются универсальными устройствами, призванными заменить все типы существующих ТТ, а будут иметь, скорее ограниченное применение в некоторых специальных случаях.

Литература

1. Poulichet P., Costa F., Labouré É. High-Frequency Modeling of a Current Transformer by Finite-Element Simulation // IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 39, № 2, March 2003.

2. Redfern M. A., Terry S. C., Robinson F. V. P., and Bo Z. Q. A Laboratory Investigation into the use of MV Current Transformers for Transient Based Protection. // International Conference on Power Systems Transients — IPST 2003 in New Orleans, USA.