

Особенности измерения токов с классом точности R

на железнодорожном транспорте

Мишель Жиларди
(Michel Ghilardi)

Марк Шеррер
(Marc Schaeffer)

Штефан Роллер
(Stéphane Rollier)

Перевод:
Владимир Рентюк

Как и во многих других областях европейского бизнеса, изменения в нормативно-правовой среде, касающиеся расчетов за потребленную железнодорожным (ж/д) транспортом электроэнергию (Railway Energy Billing), ведут все к большему ужесточению выставляемых требований. С приватизацией железных дорог рынок европейских ж/д грузовых перевозок подвергся либерализации и разделению в плане инфраструктуры, как в части органов управления, так и операторов. С начала января 2010 г. рынки пассажирских ж/д перевозок также были открыты для международной конкуренции.

Либерализация на европейском ж/д рынке привела к целому ряду последствий, в числе которых: появление новых конкурентов, работающих на каждом национальном рынке; увеличение международного передвижения и все большее количество сервисов, которые работают при прохождении состава через несколько стран; новые обстоятельства, как для внутренней, так и для межрегиональной конкуренции; рост требований по повышению прозрачности величины затрат. Последнее означает, что точное значение потребленной электроэнергии от каждой генерирующей и поставляющей компании должно быть правильно учтено, а ответственная за это служба должна быть способной выставить точный и понятный счет за потребленную электроэнергию.

Тяговые единицы ж/д подвижного состава потребляют энергию в каждой из стран, через которые они проходят во время своего пути. Чтобы иметь возможность правильно и прозрачно выставить счет за потребленную электроэнергию, ж/д компании имеют договорные отношения с каждым отдельным оператором соответствующей ж/д структуры. Таким образом, ж/д компания должна собрать и предоставить информацию о каждом пересечении границы и сделать это так, чтобы оператор мог выставить правильный и понятный счет за поставку электроэнергии.

Бортовая система измерения электроэнергии для транспорта представляет собой систему для измерения как потребляемой электрической энергии из контактной сети, так и той электроэнергии, которую тяговая единица ж/д подвижного состава возвращает в контактную сеть во время рекуперативного торможения. Повышение точности таких измерений электроэнергии позволяет операторам лучше оценить реальные объемы ее потребления и вырабатывать эффективные мероприятия по уменьшению общего потребления электроэнергии, а также осуществлять мониторинг полной электроэнергии, подаваемой из внешней си-

стемы обеспечения электрической тяги. Функция измерения электроэнергии включает в себя измерения как напряжения, так и тока. Определяющим для этого является новый стандарт EN 50463, который устанавливает необходимые характеристики преобразователей (датчиков) тока и напряжения для измерения на постоянном или переменном токах, а также для осуществления собственно функции измерения электроэнергии. Чтобы соответствовать требованиям, заложенным в упомянутом выше стандарте, компания LEM предлагает различные решения для измерения тока и напряжения на транспорте. Так, преобразователи серии DV являются оптимальными для измерения постоянного напряжения с классом точности 0,5R. А датчики серии DI, используемые совместно с шунтами класса точности 0,2, обеспечат измерение постоянного тока по классу 1R. Для измерения силы постоянного тока в соответствии с более высоким классом точности 0,5R оптимальным решением являются преобразователи тока новой серии ITS.

Измерительные приборы, предназначенные для работы в ж/д подвижном составе, имеют ряд общих черт. Они должны измерять напряжения и токи любой формы, которые могут встретиться в реальных условиях. Это могут быть постоянное, переменное напряжение и ток, импульсные напряжения и токи, а также напряжения и токи произвольной формы. Эти устройства должны быть компактными для их удобного размещения на подвижном составе. Они должны обладать низким собственным энергопотреблением и иметь высокую точность, чтобы соответствовать стандартам для выставления счетов за потребленную электроэнергию. Кроме этого, они должны иметь малый температурный дрейф параметров, хорошие изоляционные свойства для обеспечения электробезопасности, а также быть нечувствительными к воздействию внешних магнитных и электромагнитных полей, чтобы обеспечивать хорошую электромагнитную совместимость. Кроме того, от них требуется обладать малым уровнем собственного электромагнитного излучения, соответствовать стандартам по пожаробезопасности и дыму (эти требования являются обязательными в ж/д отрасли) и рядом особенностей, типичных для средств измерений, таких как стойкость к воздействию синфазных напряжений, малое время отклика, широкую полосу рабочих частот и низкий уровень собственных шумов.

Приоритетными особенностями конструктивного исполнения является их модульность, позволяющая легко интегрировать эти устройства в оборудование. Важно иметь и широкий диапазон вариантов подклю-

Таблица 1. Допустимые пределы погрешности датчиков постоянного тока в соответствии с EN 50463

Класс точности	± максимальный процент ошибки измерения тока (отношение) в зависимости от тока в первичной цепи в процентах от номинального (I _{pn}) для датчиков постоянного тока					
	1%	5%	10%	20%	100%	120%
0,2R	2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
0,5R	5	1	0,5	0,5	0,5	0,5
0,75R	7,5	1,5	0,75	0,75	0,75	0,75
1R	10	2	1	1	1	1

Примечания: Условия измерения — температура окружающей среды 23±2 °C

Таблица 2. Максимально допустимая ошибка измерения постоянного тока в зависимости от рабочей температуры

Значение тока	Тип системы	Температурный коэффициент датчика [% K]	
		Основной диапазон рабочих температур окружающей среды -10...+60 °C*	Расширенный диапазон рабочих температур окружающей среды -40...-10 °C* и +60...+75 °C*
0,1I _{pn} ≤ I ≤ 1,2I _{pn}	Постоянный ток	0,01	0,02
0,05I _{pn} ≤ I ≤ 0,1I _{pn}		0,02	0,04
0,01I _{pn} ≤ I ≤ 0,05I _{pn}		0,1	0,2

Примечание: * — точность установки температуры ±2 °C

чения со вторичной стороны, а именно: разъемы, экранированные кабели или терминалы (резьбовые шпильки M4, M5, UNC и т. д.). Также должны быть выполнены требования по высокой надежности, которые должны быть заложены конструктивно, и подтверждены широкой программой испытаний в условиях полного диапазона воздействия окружающей среды и на старение. Именно обеспечению общей точности функции измерения электроэнергии стандарт EN 50463 уделяет наибольшее внимание в части соответствия этих устройств их основным рабочим характеристикам и требованиям к ним. Так, средства измерений для учета потребленной электроэнергии при +25 °C должны обеспечивать общую погрешность измерений в 1,5% для активной мощности переменного тока, 3% для реактивной мощности переменного тока и 2% для постоянного тока. Погрешности датчика тока, датчика напряжения и вычислителя счетчика электроэнергии измеряются отдельно, а для вычисления общей погрешности измерения электроэнергии используется следующая формула:

$$\epsilon_{EMF} = \sqrt{\epsilon_{VMF}^2 + \epsilon_{CVF}^2 + \epsilon_{ECF}^2},$$

где: ϵ_{EMF} — общая погрешность измерения электроэнергии (система из датчика тока, датчика напряжения и вычислителя потребленной электроэнергии); ϵ_{VMF} — класс точности измерителя напряжения (датчик напряжения); ϵ_{CMF} — класс точности измерителя тока (датчик тока); ϵ_{ECF} — класс точности вычислителя потребленной электроэнергии (счетчика).

Среди всего прочего, стандартом EN 50463 устанавливаются пределы погрешности и для измерения на постоянном токе. Их значения приведены в таблице 1.

Для преобразователей переменного тока максимально допустимая погрешность при уровне тока первичной цепи, равном 1% от номинального (I_{PN}), составляет всего лишь 5% (класс 1R)! Это весьма сложная задача с точки зрения обеспечения линейности измерительной системы на краях ее диапазона измерений. Таблица 2 показывает допустимый уровень

ошибки измерений в рабочем диапазоне температур для указанных диапазонов постоянного тока по отношению к номинальному. Еще раз повторим, что это достаточно высокие требования для системы измерения.

Если каждый из различных измерительных приборов — датчик напряжения, датчик тока и вычислитель счетчика энергии — имеет класс точности, равный 1R, то общая точность счетчика потребленной электроэнергии будет равна 1,732%, это следует из расчета, проведенного по формуле, представленной выше. В общем, этого вполне достаточно, чтобы выполнить требования по погрешности системы измерения постоянного тока (по стандарту требуется 2,0%). Однако требуемая общая погрешность должна быть обеспечена в течение всего времени верификации измерительной системы. Это промежуток времени длительностью в несколько лет, сколько — еще предстоит определить. Чтобы быть уверенным в достаточном запасе по точности измерений в течение всего времени эксплуатации измерительной системы, желательно выбирать приборы более высокого класса точности, чем разрешено стандартом. Для мультисистемных поездов допустимо использовать один датчик напряжения или тока для двух или более систем напряжения. В этом случае действуют следующие правила:

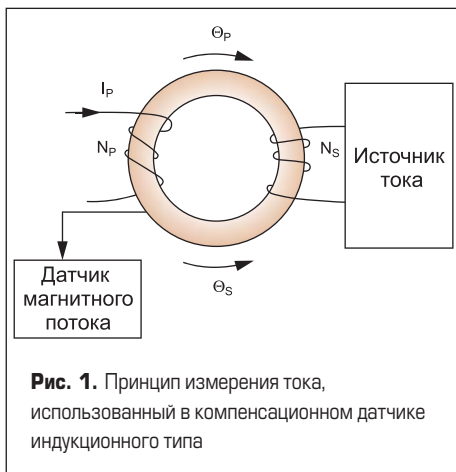


Рис. 1. Принцип измерения тока, использованный в компенсационном датчике индукционного типа

- Датчик напряжения должен соответствовать требованиям по точности для каждой системы напряжения.
- Датчик тока должен выполнять требования по точности для самого высокого из номинальных токов систем. Для систем с меньшими номинальными токами установлены более низкие требования к точности измерения.
- Для вычислителя в системе учета электроэнергии применимы те же условия, что и для датчика тока.

Выполнение требований стандарта EN 50463 в части измерения тока

В ответ на развитие рынка подвижного ж/д состава и задач измерения тока как для транспортных, так и для промышленных приложений, компанией LEM была задумана и разработана новая серия датчиков тока. В линейке представлены три модели для измерения тока (как постоянного, так и переменного) с номиналом до 4000 А эффективного значения (6000 А пикового). Они предназначены для транспортных средств, работающих от контактной сети с напряжением до 3000 В. Указанные датчики обеспечивают значительный запас по точности для класса точности 1R (“R” указывает на соответствие датчика требованиям для подвижного ж/д состава), фактически обеспечивая точность по классу 0,5R.

Первоначальные проектные исследования подтвердили, что для достижения такого уровня точности необходим датчик на основе компенсационной технологии индукционного типа (Closed Loop Flux Gate). Основной принцип этого метода измерений показан на рис. 1.

Первичный ток I_p протекает в проводнике, проходящем через отверстие в магнитном сердечнике (рис. 1), что приводит к появлению потока индукции Φ_p. Для точного измерения постоянных токов метод основан на компенсации (балансировке или обнулении) потока индукции Φ_p противоположным потоком Φ_s, который создает компенсирующий ток I_s.

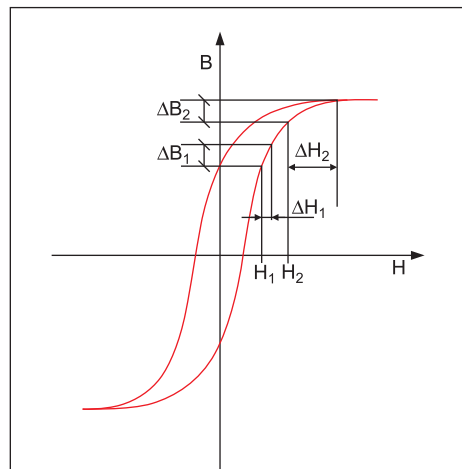
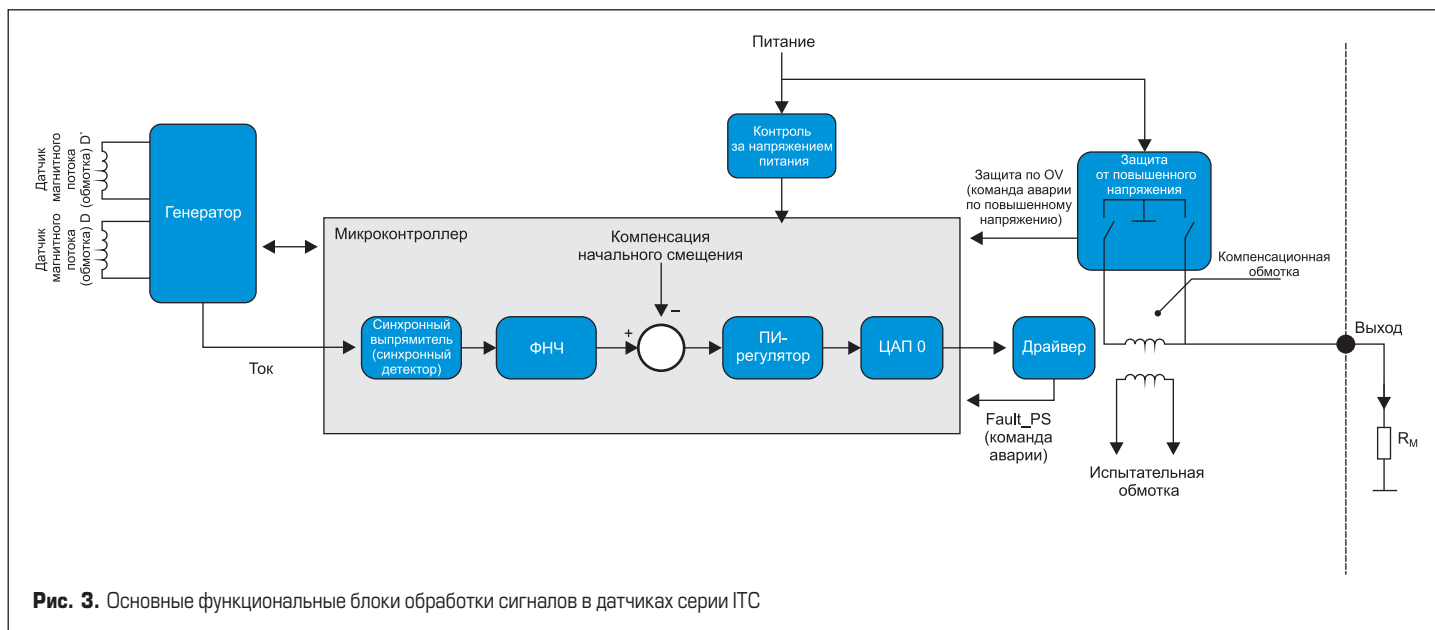


Рис. 2. Гистерезис в магнитных сердечниках (в разных точках на кривой требуются различные приращения напряженности магнитного поля H для получения одного и того же приращения плотности магнитного потока B)



Стандарты, регулирующие измерения для ж/д транспорта

В настоящее время имеется несколько стандартов, которые применимы к различным видам оборудования, предназначенного для ж/д транспорта. Стандарт EN 50155 «Электронное оборудование, используемое на подвижном составе» в ж/д отрасли, является базовым стандартом в части требований к электрическим, механическим характеристикам и условиям окружающей среды. Он гарантирует общие характеристики для всей нашей продукции, которая предназначена для использования на ж/д транспорте.

Новый стандарт EN 50463 нацелен в первую очередь на установку требований в части измерения потребляемой электроэнергии. Стоит отметить, что датчики DV, DI и серии ITC могут с небольшим снижением точности использоваться и для приложений, когда имеет место переключение от одной контактной сети питания к другой, вызванное пересечением границы и переходом из одной зоны подачи электроэнергии в другую. Эти датчики также имеют очень низкую чувствительность к влиянию внешних магнитных полей постоянного или переменного тока.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) регулируется стандартом EN 50121-3-2, который определяет нормы по уровням излучения и восприимчивости электромагнитных и радиопомех. Этот стандарт по ЭМС для оборудования для железных дорог в своей последней редакции устанавливает более высокие требования в части ЭМС, чем существующие требования типовых стандартов для промышленных приложений. В этом смысле датчики серий DV, DI и ITC полностью удовлетворяют этим более высоким требованиям.

В качестве базового стандарта для расчета длин путей токов утечки и воздушных зазоров датчиков DV, DI и ITC был использован стандарт EN 50124-1 («Основные требования по зазорам и путям токов утечки для электрического и электронного оборудования»), устанавливающий требования по изоляции и электробезопасности.

Аналогично, материалы, используемые в конструкции датчиков, соответствуют требованиям стандарта NFF 16101/2 по пожаробезопасности и дымообразованию (протоколы испытаний для материалов доступны по запросу). Датчики DV, DI и ITC выпускаются сертифицированными по ж/д стандарту IRIS производственными подразделениями компании LEM, имеют маркировку CE в соответствии с Европейской Директивой по ЭМС 2004/108/ЕЕС и Директивой по низковольтному оборудованию.

Для обеспечения необходимой точности измерения нужно иметь очень точный прибор для прецизионного измерения условия $\Theta = 0$. Работа датчиков магнитного потока (феррозондовых детекторов) основана на характерной для магнитных материалов нелинейной зависимости между напряженностью магнитного поля H и плотностью магнитного потока B . Эта зависимость показана на рис. 2.

Для функционирования индукционный детектор использует специальную обмотку на тороидальном сердечнике, а колебания напряжения, приложенные к ней, индуцируют в материале сердечника циклы изменения напряженности магнитного поля и потока в соответствии с представленной выше петлей гистерезиса $B-H$.

Если приложить к этой обмотке напряжение прямоугольной формы, приводящее к насыщению сердечника, то это напряжение создаст ток в обмотке. В отсутствие первичного тока, то есть когда $I_p = 0$, ток в обмотке возбуждения будет симметричным. Когда через отверстие сердечника протекает постоянный ток, кривая цикла гистерезиса сместится, в результате чего будет внесена асимметрия в ток, создаваемый напряжением прямоугольной формы. Затем этот ток измеряется с помощью точного нагрузочного резистора, а его асимметрия используется для управления компенсирующим током во вторичной обмотке так, чтобы он точно скомпенсировал действие тока первичной цепи (рис. 3).

Компания LEM усовершенствовала описанную выше базовую концепцию, получив тем самым датчик тока, который с большим запасом превышает требования по точности измерения, установленные стандартом EN 50463. Так, например, используется не один датчик магнитного потока (феррозондовый детектор), а два, что позволяет свести к минимуму (компенсировать) некоторые ошибки измерения; процессом измерения управляет высокопроизводительный микроконтроллер, который после воздействия переходного процесса от броска тока удерживает до 100 кА в течение

100 мкс обеспечивает поэтапное восстановление системы; обработка измерений происходит в цифровом виде, а выходной аналоговый сигнал генерируется цифро-аналоговым преобразователем, этот сигнал является опорным для ШИМ-генератора выходного каскада усилителя работающего в классе D, что не только снижает рассеивание мощности преобразователем тока, но и уменьшает и балансирует потребляемый ток от источника питания.

Серия датчиков ИТС удовлетворяет всем требованиям к измерительному оборудованию для ж/д транспорта и обеспечивает класс точности 0,5R, определенный стандартом EN50463 в части требований к бортовой аппаратуре мониторинга электропотребления в диапазоне температур $-40...+85$ °C. Датчики этой серии одинаково подходят для любых применений, в которых необходимо измерять токи порядка кА с погрешностью 0,5% на уровнях от 5% до 120% от их номинальной величины (рис. 4).



Рис. 4. Серия датчиков тока ИТС: вариант с модулем обработки сигналов, вынесенным в отдельный корпус (слева) облегчает монтаж датчика под крышкой электровоза