

# Измерение потерь в элементах с реактивным сопротивлением, работающих на высоких коммутационных частотах

**В статье рассматривается метод измерения и анализа потерь в катушках индуктивности (дресселей) с использованием анализатора электрической мощности.**

**Казунобу Хаяси  
(Kazunobu Hayashi)**

**Перевод:  
Владимир Рентюк**

## Вступление

Компоненты с реактивным сопротивлением, работающие на высоких частотах, применяются в электромобилях и гибридных автомобилях, например в повышающих DC/DC-преобразователях между батареями и инвертором, а также в AC/DC-преобразователях в цепях зарядки аккумулятора.

Чтобы повысить суммарную эффективность системы, требуется повысить КПД каждого элемента ее электрической схемы. Элементы с реактивным сопротивлением отвечают за наибольшую часть вносимых потерь в электрических цепях. Следовательно, точное измерение потерь, вносимых такими элементами, является важной задачей для повышения эффективности системы.

Поскольку большинство компонентов с реактивным сопротивлением коммутируется на высоких рабочих частотах, считается, что непосредственно измерить их потери в реальной схеме весьма трудно. В прошлом в качестве ключей наиболее широко использовались IGBT, а коммутационные частоты составляли порядка десятков килогерц. Однако в последние годы был достигнут прогресс в коммерческом использовании транзисторов и модулей, выполненных на базе технологии

карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN), что позволило увеличить рабочие частоты импульсных преобразователей до более чем 100 кГц. В результате появился спрос на измерительные приборы, которые выполняют измерения в области таких высоких частот. В этой статье на конкретном примере описывается высокоточный метод измерения потерь в катушках индуктивности.

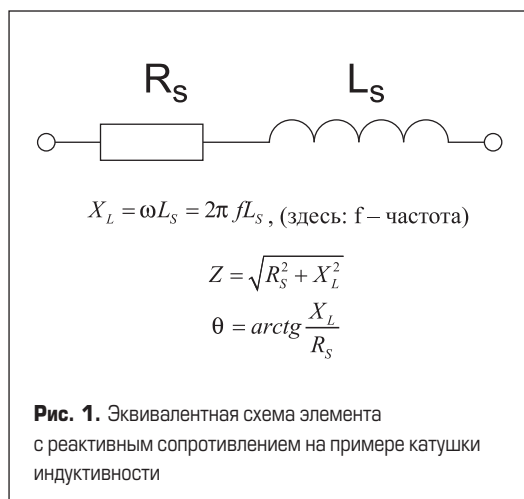
## Реактивные потери

На рис. 1 показана эквивалентная схема катушки индуктивности. Это схема с индуктивностью  $L_S$ , соединенной последовательно с активным сопротивлением  $R_S$ , которое является источником потерь.

Значения  $L_S$  и  $R_S$  эквивалентной схемы можно измерить с помощью стандартного LCR-измерителя. Однако в таком методе измерения импеданса катушки индуктивности LCR-метр использует синусоидальный сигнал невысокого уровня. Характеристики этой катушки в реальных условиях отличаются от результатов, полученных с помощью LCR-измерителя, по целому ряду следующих причин.

- К реактивному элементу в импульсном преобразователе прилагается напряжение прямоугольной формы, в результате чего через дроссель протекает ток треугольной формы. Следовательно, в реальных условиях ни сигнал напряжения, ни сигнал тока не имеют синусоидальной формы.
- Из-за свойств магнитного сердечника дросселя оба его параметра зависят от уровня тока. Эта зависимость приводит к тому, что  $L_S$  и  $R_S$  во время работы компонента отличаются от значений, полученных при измерении с помощью LCR-метра.
- При использовании катушки в DC/DC-преобразователе появляется составляющая постоянного тока, из-за чего параметры катушки отличаются от измеренных в силу насыщения магнитного сердечника.

Короче говоря, высокоточное измерение потерь и параметров реактивного элемента (в рассматриваемом случае — катушки индуктивности) должно выполняться не с помощью стандартного LCR-измерителя, а в рабочем состоянии.



**Метод измерения реактивных потерь**

На рис. 2 в качестве примера представлена структурная схема измерения потерь в дросселе, который применяется в схеме чоппера — повышающего импульсного DC/DC-преобразователя. В этом примере для измерения используются анализатор электрической мощности Power Analyzer PW6001PW6001 с датчиком тока. Этот прибор непосредственно измеряет напряжение  $U_L$ , которое приложено к дросселю, и ток  $I_L$ , а уже затем вычисляет потери. Мощность, измеренная с помощью такой установки, состоит из мощности, потребляемой обмоткой и сердечником. Таким образом, речь идет об общих потерях дросселя.

Точность этого измерения можно увеличить, максимально укоротив измерительные провода, подключенные к анализатору электрической мощности. Такая мера принимается не только в отношении провода датчика тока, но и проводов для измерения падения напряжения на дросселе. Кроме того, необходимо учитывать влияние на дроссель металлических предметов и внешних магнитных полей. Поскольку длина измерительных проводов и сторонние металлические предметы могут повлиять на результаты измерения, следует принять известные меры предосторожности. С учетом того, что на результаты измерения могут оказать влияние еще и внешние электромагнитные помехи (ЭМП), желательно свить провода, с помощью которых измеряется напряжение на дросселе.

Потери в сердечнике измеряются по опыту холостого хода, как это показано на рис. 3. Поскольку они определяются как площадь петли магнитного гистерезиса по индукции (в координатах В–Н), потери в сердечнике на единицу его объема  $P_C$  рассчитываются следующим образом:

$$P_C = \frac{1}{T} \int HdB = \frac{1}{T} \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt,$$

где  $T$  — длительность одного периода цикла петли магнитного гистерезиса в координатах В–Н.

Если длина пути потока магнитной индукции равна  $l$ , а площадь поперечного сечения сердечника —  $A$ , то отношения между током первичной обмотки  $i$  и магнитным полем  $H$ , а также между напряжением  $v$  вторичной обмотки и плотностью потока магнитной индукции  $B$  определяются следующим образом:

$$H = \frac{N_1 i}{l},$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{v}{N_2 A}.$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — количество витков в обмотках.

Следовательно, потери в сердечнике на единицу объема рассчитываются так:

$$P_C = \frac{1}{lA} \times \frac{N_1}{N_2} \times \frac{1}{T} \int v i dt = \frac{1}{lA} \times \frac{N_1}{N_2} \times P,$$

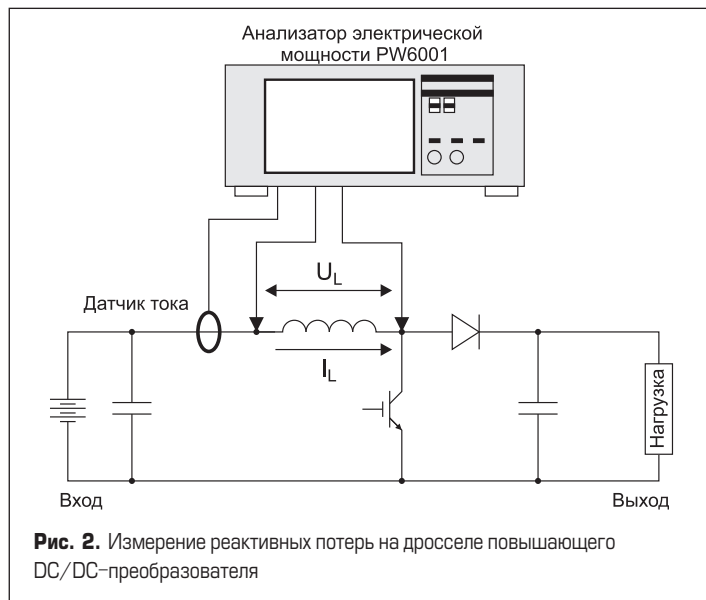
где  $P$  — мощность, рассчитанная по току первичной обмотки  $i$  и напряжению на вторичной обмотке  $v$ .

Кроме того, поскольку объем сердечника задается параметром  $lA$ , его общие потери  $P_{CALL}$  определяются следующим образом:

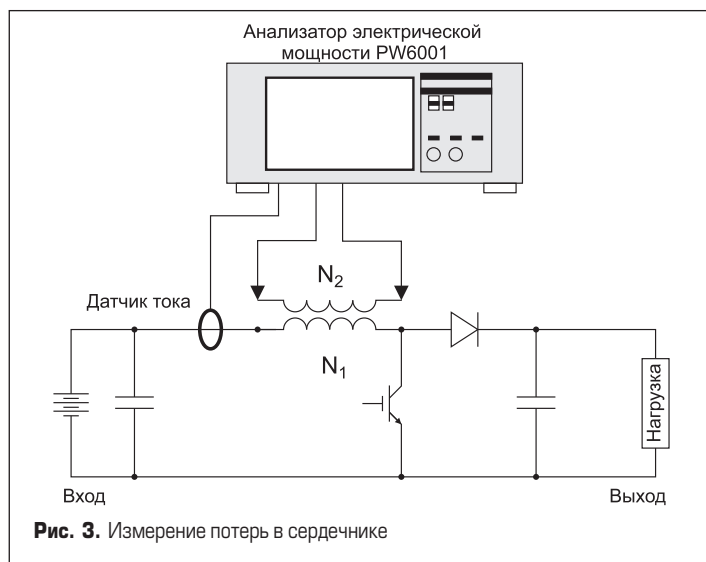
$$P_{CALL} = P_C \times lA = \frac{N_1}{N_2} \times P.$$

Итак, используя установку, показанную на рис. 3, можно измерить потери в сердечнике в реальных условиях.

Весьма полезной опцией рассматриваемого анализатора электрической мощности Power Analyzer PW6001 является его возможность сохранять в виде CSV-файлов 16-бит данные напряжения и тока с выборкой 5 Мвыб/с, а также передавать данные в среду MATLAB. Таким образом, этот инструмент представляет более точные осциллограммы результатов измерения, чем можно получить при использовании стандартного прибора. Эти данные также можно использовать в аналитических целях, например для создания и оценки петли магнитного гистерезиса в координатах В–Н.



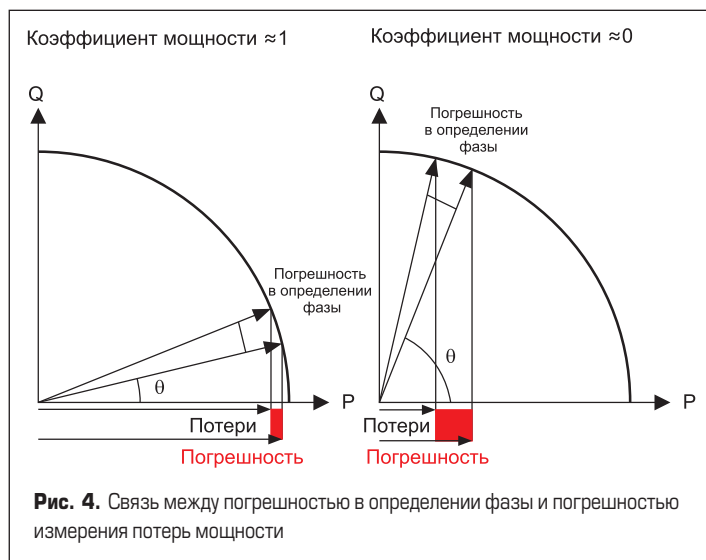
**Рис. 2.** Измерение реактивных потерь на дросселе повышающего DC/DC-преобразователя



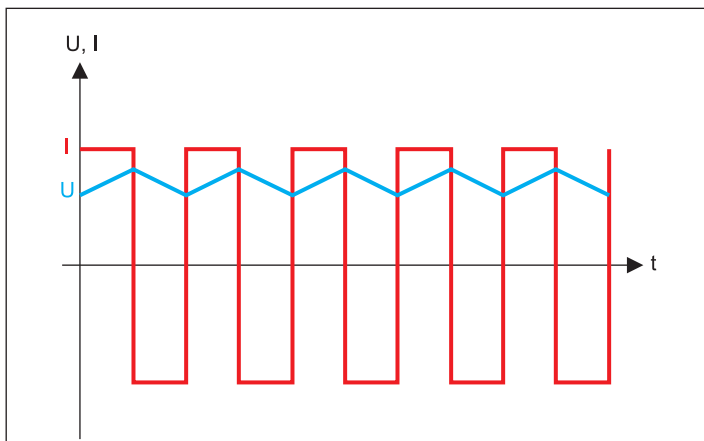
**Рис. 3.** Измерение потерь в сердечнике

**Проблемы измерения реактивных потерь**

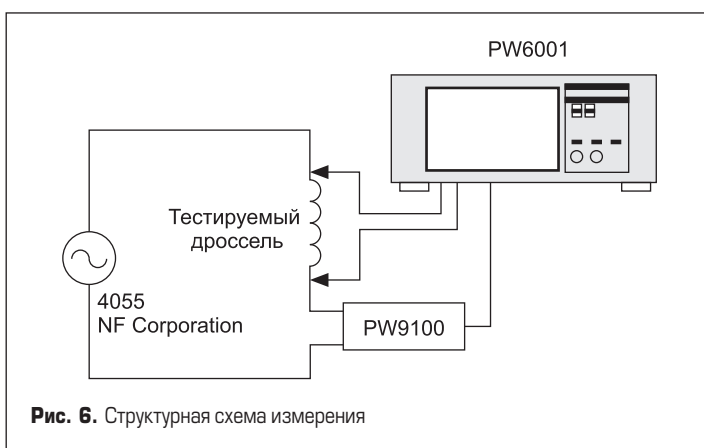
Как видно из уравнений на рис. 1, основным параметром, который определяет импеданс дросселя, является его собственная индуктивность  $L_C$ . С точки зрения измерения мощности, катушка индуктивности характеризуется низким коэффициентом мощности, т. е. разность фаз между напряжением и током у нее близка к  $90^\circ$ . Как видно из рис. 4,



**Рис. 4.** Связь между погрешностью в определении фазы и погрешностью измерения потерь мощности



**Рис. 5.** Формы напряжения и тока, которые соответствуют дросселю в схеме повышающего DC/DC-преобразователя



**Рис. 6.** Структурная схема измерения

влияние погрешности в определении разности фаз при измерении напряжения и тока намного больше, чем при измерении компонентов с высоким коэффициентом мощности. Следовательно, приборы должны обладать максимально высокой степенью точности при измерении фазы.

Катушки индуктивности в преобразователях и инверторах работают на частотах переключения в диапазоне от десятков до сотен килогерц. Применение транзисторов и модулей, выполненных по технологии SiC и GaN, позволяет увеличить коммутационные частоты. Соответствующие измерительные приборы должны обладать высокой точностью измерения фазы. Кроме того, при использовании датчиков тока необходимо учитывать их собственную фазовую погрешность.

**Таблица 1.** Технические характеристики измеряемой катушки индуктивности

Наименование параметра	Значение
Материал сердечника	MnZn-феррит
Число витков	5
Сопротивление по постоянному току RDC	7 мОм

**Таблица 2.** Настройка пользовательских вычислений

Параметр	Формула
Z	$U_{fnd} / I_{fnd}$
$X_L$	$Z \sin(\theta_U - \theta_I)$
$R_s$	$Z \cos(\theta_U - \theta_I)$
$L_s$	$X_L / 2\pi f$
$U_{fnd}, I_{fnd}$	Напряжение и ток, измеренные на основной частоте
$\theta_U, \theta_I$	Фазы напряжения и тока, измеренные на основной частоте
f	Основная частота

Поскольку на результат измерения напряжения и тока в схеме на рис. 2 влияет большое синфазное напряжение, требуется прибор с высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала (Common Mode Rejection Ratio, CMRR).

Среда, в которой применяются катушки индуктивности с коммутационными частотами в диапазоне от нескольких десятков до сотен килогерц, характеризуется очень большим количеством ЭМП. Следовательно, необходимо оборудование еще и с высокой помехоустойчивостью.

Таким образом, измерение реактивных потерь в дросселях является сложным процессом, требующим приборов с отличными рабочими характеристиками. Этим требованиям соответствует анализатор Power Analyzer PW6001, который имеет:

- широкую полосу частот и позволяет измерять фазу с высокой точностью благодаря датчику тока с компенсированной фазовой характеристикой [1];
- высокий CMRR (не менее 80 дБ на 100 кГц);
- высокую помехоустойчивость благодаря специально разработанному датчику тока [2, 3].

### Характеристики прибора для измерения реактивных потерь

На рис. 5 показаны сигналы напряжения и тока через дроссель в схемах, подобных той, что показана на рис. 2. Сигнал напряжения имеет прямоугольную форму, а ток — треугольную с постоянной составляющей. Для измерения потерь с точностью 0,1% в схеме с сигналами такой формы требуется полоса частот, которая примерно в пять-семь раз превышает коммутационную частоту [4]. Например, при частоте коммутации 100 кГц измерение должно проводиться в полосе частот 500–700 кГц.

Заметим, что высокая точность требуется не только для измерения амплитуды напряжения или тока, но и разности фаз между напряжением и током. Чтобы измерить высокочастотный ток, превышающий несколько ампер, применяется специальный датчик тока [2]. Поскольку его погрешность в определении фазы на таких частотах нельзя пренебречь, применяется соответствующий метод фазовой коррекции.

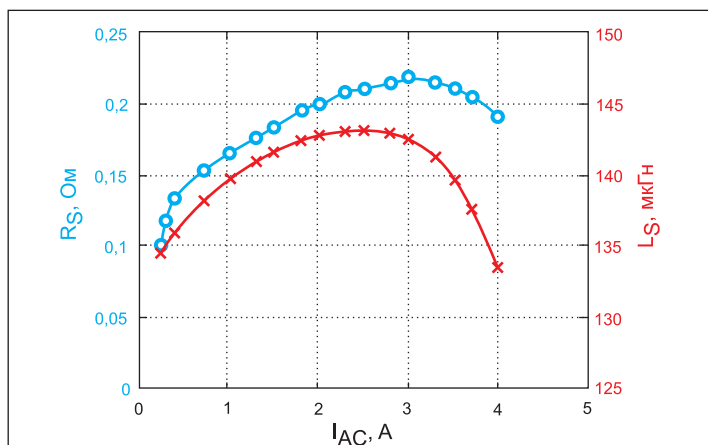
Большинство производителей анализаторов электрической мощности и осциллографов выполняют эту коррекцию путем компенсации сдвига по фазе. В зависимости от характеристик датчика тока этот подход требует использования времени задержки, специфичного для каждой измеряемой частоты. В результате возникают большие погрешности при измерении искаженных и несинусоидальных сигналов — например треугольной формы, у которых гармоники находятся в достаточно широкой полосе частот. Используя Power Analyzer PW6001 с высокоточным датчиком, функцией компенсации фазового сдвига и учитывая фазовую погрешность этого датчика тока, можно осуществлять измерения с низкой фазовой погрешностью в широком диапазоне частот.

### Практический пример измерения реактивного элемента

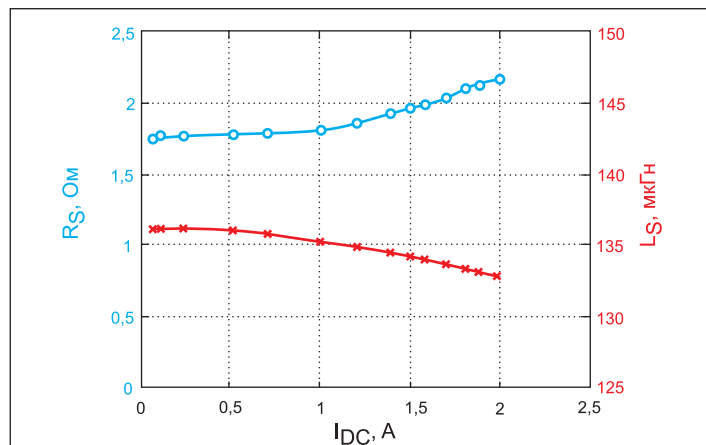
Рассмотрим практический пример измерения параметров катушки индуктивности с помощью анализатора электрической мощности Power Analyzer PW6001 и датчика тока Current Voh PW9100. На рис. 6 представлена принципиальная схема измерения, а в таблице 1 приведены характеристики измеряемой катушки индуктивности. Измерение проводилось с использованием синусоидального сигнала от усилителя мощности (4055, NF Corporation).

Анализаторы электрической мощности применяются для измерения таких параметров, как среднеквадратичное значение (RMS) напряжения и тока, а также разность фаз и мощность. Анализатор PW6001 позволяет объединять эти основные измеренные значения в виде задаваемых пользователем расчетов, которые можно выполнять в реальном времени. Параметры дросселя измеряются путем настройки пользовательских вычислений, приведенных в таблице 2.

На рис. 7 показано, как изменяются собственная индуктивность  $L_s$  и активное сопротивление  $R_s$  в зависимости от уровня тока



**Рис. 7.** Пример измерения, иллюстрирующий зависимость индуктивности и сопротивления от переменной составляющей тока ( $f = 10$  кГц)



**Рис. 8.** Пример измерения, иллюстрирующий влияние составляющей постоянного тока на индуктивность и сопротивление ( $f = 100$  кГц)

дросселя на частоте 10 кГц, а на рис. 8 — изменение собственной индуктивности  $L_S$  и активного сопротивления  $R_S$  в зависимости от постоянной составляющей в условиях, когда среднеквадратичное значение переменного тока фиксируется на уровне 0,5 А при частоте 100 кГц. Обычно LCR-измерители выполняют измерения тока порядка нескольких десятков миллиампер. Кроме того, диапазон токов смещения постоянного тока, который генерируется такими приборами, крайне ограничен. Из-за этих ограничений измеряемые параметры отличаются от значений, характеризующих фактические условия эксплуатации. Как показывает этот пример, анализатор электрической мощности и источник питания можно объединить так, чтобы измерение параметров дросселя осуществлялось при тех значениях тока, которые соответствуют фактическим условиям эксплуатации.

Этот пример иллюстрирует использование в измерениях источника питания с синусоидальным током и напряжением. В действительности же дроссели в преобразователях работают с сигналами напряжения прямоугольной формы и тока треугольной формы, а не с синусоидальными сигналами. Анализатор электрической мощности PW6001 позволяет измерять параметры катушек индуктивности и в таких условиях. Кроме того, параметры  $L_S$  и  $R_S$  рассчитываются по результатам вычислений, выполненных указанным прибором для более точного анализа.

## Выводы

Мы рассмотрели на практическом примере метод измерения и анализа потерь дросселей, работающих на высоких частотах. Для точного измерения потерь и других параметров катушек индуктивностей, работающих на высоких частотах преобразования энергии, необходимо выполнять измерения, которые соответствуют фактическим условиям эксплуатации. Кроме того, мы рассмотрели характеристики, которые требуются анализатору электрической мощности для проведения этих измерений, а также пример использования анализатора электрической мощности Power Analyzer PW6001 для измерения и анализа потерь в дросселях в широком диапазоне тока и частоты.

## Литература

1. Yoda H. Power Analyzer PW6001//HIOKI Technical Notes. 2016. Vol. 2. №1.
2. Yoda H., H. Kobayashi and S. Takiguchi. Current Measurement Methods that Deliver High Precision Power Analysis in the Field of Power Electronics//Bodo's Power Systems. April 2016.
3. Ikeda K. and H. Masuda. High-Precision, Wideband, Highly Stable Current Sensing Technology//Bodo's Power Systems. July 2016.
4. Hayashi K. High-Precision Power Measurement of SiC Inverters//Bodo's Power Systems. September 2016.