

# Внутрисхемное измерение параметров дросселей и трансформаторов в ИИП

Уилсон Ли (Tektronix)

**Дроссели и трансформаторы являются сердцем импульсных источников питания и используются в фильтрах, повышающих/понижающих преобразователях, устройствах развязки, накопителях энергии и генераторах. Обеспечение их нормальной работы требует проведения тщательных внутрисхемных измерений в рабочих условиях. Современные осциллографы с прикладным ПО анализа мощности предлагают быстрые настройки и повышенный уровень воспроизводимости измерений.**

В импульсных источниках питания (ИИП) важную роль играют индуктивные компоненты, а именно дроссели и трансформаторы. В процессе проектирования ИИП приходится опираться на технические характеристики компонентов и их модели для симуляторов, однако в реальных условиях паразитные сигналы, температура и другие внешние воздействующие факторы могут влиять на характеристики индуктивных компонентов, вследствие чего источник питания будет работать не так, как можно было бы предположить на основе технических характеристик и моделирования. В результате внутрисхемные измерения дросселей и трансформаторов в рабочих условиях играют определяющую роль в обеспечении надёжной работы ИИП.

Далее речь пойдёт об основах работы дросселей и трансформаторов, особенно в отношении внутрисхемных измерений, применении осциллографов и пробников во время работы источника питания, а также об определении значений индуктивности и построении кривых  $B-H$  для оценки технических характеристик.

## Принцип действия дросселей

Согласно законам Ленца и Фарадея, ток, протекающий через дроссель, и

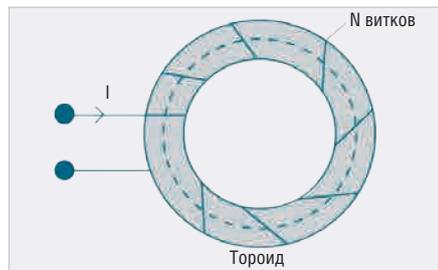


Рис. 1. Простейший дроссель – обмотка на замкнутом ферромагнитном сердечнике

напряжение на нём связаны уравнением:

$$U = -L \times \frac{di}{dt}$$

Отсюда следует, что индуктивность можно представить как некий коэффициент преобразования скорости изменения тока в напряжение противоположного знака. Интегрируя, перегруппировывая и пренебрегая знаком, можно получить следующее уравнение для индуктивности:

$$L = - \frac{\int U \times dt}{i}$$

Из этого уравнения следует, что индуктивность можно определить как функцию, зависящую от изменения тока и напряжения во времени. Такое измерение во временной области лучше выполнять осциллографом, оснащённым пробником напряжения и пробником тока, а также способным выполнять интегрирование и строить графики зависимостей в координатах  $X$  и  $Y$ .

В отличие от идеального дросселя, индуктивность реального дросселя зависит от величины тока, температуры и рабочей частоты. В источнике питания эти параметры могут зависеть от режимов работы и меняться во времени.

Например, индуктивность тороидального дросселя, показанного на рисунке 1, можно приблизительно определить по формуле:

$$L \approx \frac{\mu \times N^2 \times A}{2\pi \times r}$$

где:  $\mu$  – магнитная проницаемость сердечника,  $N$  – число витков обмотки,  $r$  – радиус сердечника в сантиметрах (измеренный до центральной

пунктирной линии),  $A$  – площадь поперечного сечения сердечника в квадратных сантиметрах (предполагается малой по сравнению с радиусом тороида).

Поскольку в формуле представлено число витков в квадрате, оно даёт максимальный вклад в значение индуктивности. Магнитная проницаемость материала сердечника также играет значительную роль, однако значение индуктивности зависит и от геометрических размеров компонента. Чтобы минимизировать размер дросселей, в них, как правило, используют материалы, магнитная проницаемость которых значительно превышает магнитную проницаемость воздуха.

Таким образом, характеристики материала и геометрия сердечника сильно влияют на значение индуктивности в разных рабочих условиях, а также на потери мощности в устройстве.

## Измерение индуктивности

Для определения необходимых значений индуктивности разработчики источников питания обычно используют методы моделирования. После изготовления дросселя его индуктивность проверяют с помощью измерителя RLC, однако большинство таких измерителей подаёт на измеряемый компонент синусоидальный сигнал в узком диапазоне частот, поэтому, хотя этот метод вполне пригоден для грубой оценки индуктивности, он плохо предсказывает характеристики дросселя в реальной схеме.

Индуктивность дросселя зависит от протекающего через него тока и напряжения, формы и частоты сигнала возбуждения, которые в реальных условиях могут меняться со временем, поэтому важно измерять и наблюдать поведение дросселя непосредственно в динамически изменяющейся среде источника питания.

Такие измерения можно выполнить, регистрируя напряжение на устройстве, как правило с помощью дифференциального пробника. Для измерения тока, протекающего через индуктивный компонент, обычно используется пробник

тока. Для определения индуктивности встроенная в осциллограф программа анализа мощности интегрирует напряжение по времени и делит результат на величину изменения тока. Кроме того, она устраняет постоянное смещение и использует усреднение для расчёта индуктивности.

Измеряя индуктивность трансформатора, важно отключить нагрузку от вторичной обмотки. Измерение первичной обмотки трансформатора без нагрузки эквивалентно измерению дросселя с одной обмоткой. При определении значений индуктивности связанной катушки с несколькими обмотками на одном сердечнике полученные данные будут отличаться от реальных из-за влияния тока, протекающего в других обмотках.

На рисунке 2 показано измерение среднего значения индуктивности в генри. Жёлтая кривая (канал 1) представляет собой напряжение на дросселе, а синяя кривая (канал 2) – ток, протекающий через него. Левый график показывает зависимость тока  $i$  от  $\int U \times dt$ , наклон которой равен индуктивности.

На рисунке 3 показана измеренная зависимость  $i$  от  $\int U$ , которая позволяет глубже понять поведение индуктивности. Здесь наблюдается постоянное смещение, накапливающееся за миллисекундные периоды. Жёлтая кривая (канал 1) представляет собой напряжение на дросселе, а синяя кривая (канал 2) – ток, протекающий через него.

### ИЗМЕРЕНИЕ КРИВОЙ $B-H$

Индуктивные компоненты источника питания проектируются в расчёте на определённые напряжение, ток, топологию и конкретный тип силового преобразователя. Рабочие режимы дросселей и трансформаторов помогают достичь стабильности импульсного источника питания. Однако рабочие характеристики источника могут отличаться во время включения, стабильной работы, при изменении нагрузки и условий окружающей среды, что сильно усложняет учёт всех возможных сценариев в процессе проектирования.

Для обеспечения стабильности ИИП важно определить рабочую область индуктивного компонента. Как правило, нужно не допустить насыщения сердечника и обеспечить работу в линейной области кривой гистерезиса. Тем не менее расчёт индуктивного компонента и обеспечение его



Рис. 2. Измерение среднего значения индуктивности, Гн

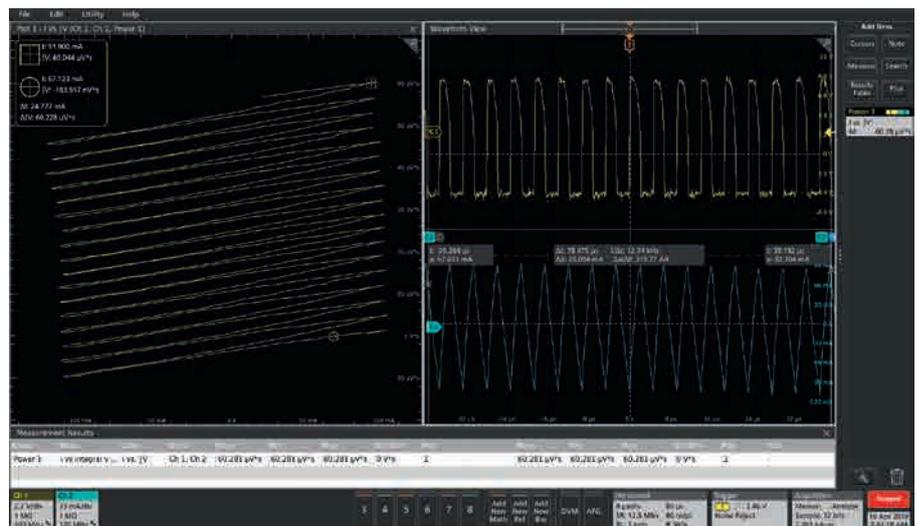


Рис. 3. Измеренная зависимость  $i$  от  $\int U$

работы в линейной области гистерезиса во всех условиях является очень сложной задачей.

Кривые  $B-H$ , аналогичные той, что показана на рисунке 4, помогают разработчикам визуализировать поведение дросселя и его сердечника. В данном примере  $H$  представляет собой напряжённость магнитного поля в устройстве. Она измеряется в А/м и пропорциональна току:

$$H = \frac{i \times N}{l}$$

Результирующая магнитная индукция  $B$  пропорциональна интегралу от напряжения на устройстве. Магнитная индукция измеряется в теслах и характеризует силу магнитного поля. Она определяет силу воздействия магнитного поля на движущийся заряд.

Эта кривая позволяет оценить следующие важные характеристики:

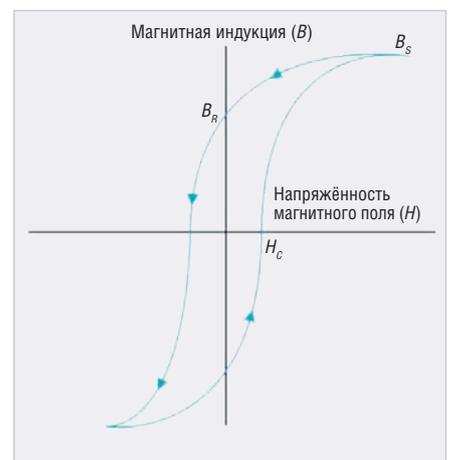


Рис. 4. Кривая  $B-H$

- магнитная проницаемость  $\mu$  (измеряется в Гн/м; является характеристикой материала сердечника и равна скорости, с которой напряжённость магнитного поля  $H$  (зависящая от тока) порождает магнитную индукцию  $B$  (интеграл от напряжения); рав-

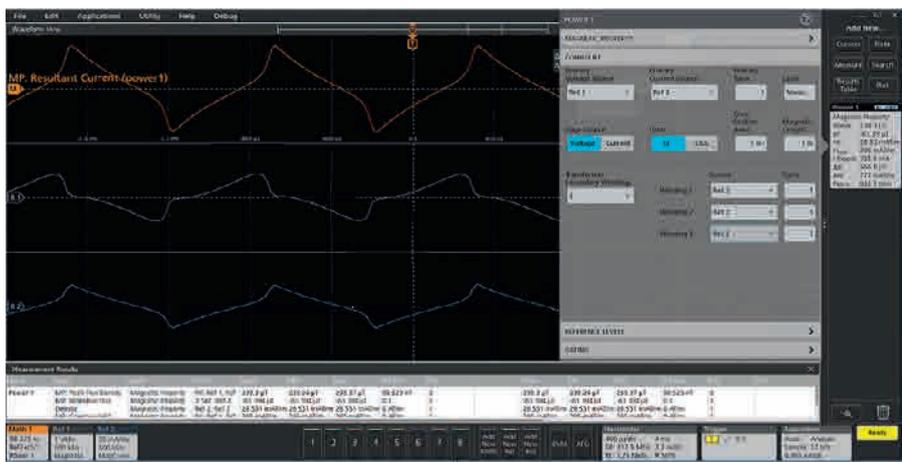


Рис. 5. Измерение характеристик трансформатора с несколькими вторичными обмотками

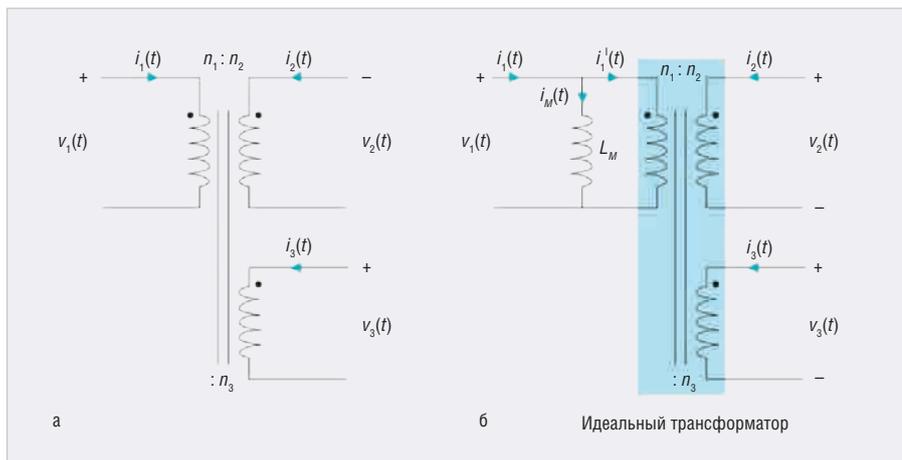


Рис. 6. Учёт индуктивности намагничивания: а) в схеме трансформатора; б) в эквивалентной схеме

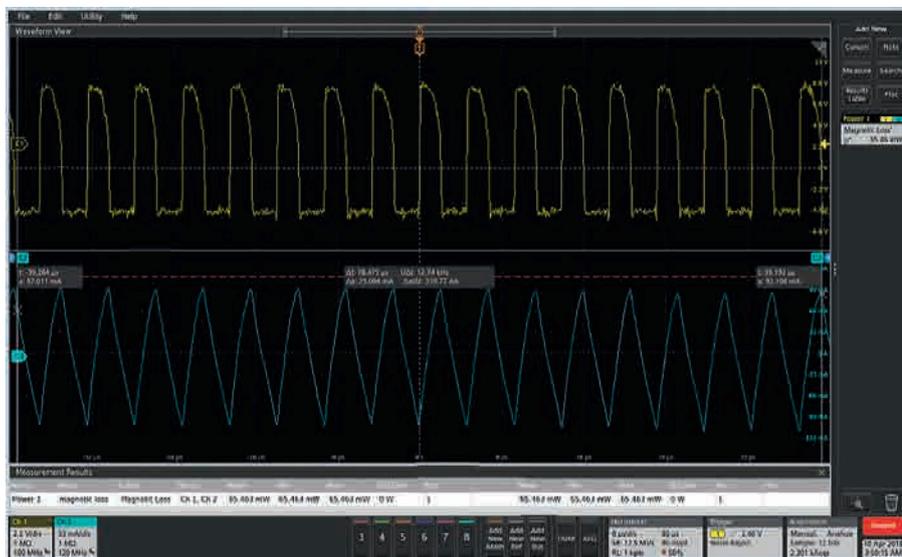


Рис. 7. Пример измерения полных магнитных потерь

на наклону кривой  $B-H$ ; для создания компактных дросселей и трансформаторов разработчики используют материалы с большой магнитной проницаемостью);

- магнитная индукция насыщения (точка, в которой дальнейший рост напряжённости магнитного поля  $H$

перестаёт порождать дополнительный рост магнитной индукции  $B$ ; в большинстве источников питания разработчики должны избегать насыщения);

- параметры гистерезиса (гистерезисом называется «ширина» кривой  $B-H$ , и он характеризует потери ис-

точника питания; большинство разработчиков старается применять магнитомягкие материалы с малым значением остаточной намагниченности  $B_R$  – магнитной индукции, которая остаётся в материале после снятия магнитного поля, и малой коэрцитивной силой  $C$ , равной значению  $H$ , необходимому для снижения магнитной индукции  $B$  до нуля).

Потенциальную стабильность можно определить по следующим признакам:

- если измеренная пиковая магнитная индукция приближается к магнитной индукции насыщения, определённой в технических характеристиках, это означает, что компонент приближается к точке насыщения;
- если кривые  $B-H$  меняются от периода к периоду, это свидетельствует о наличии насыщения; в стабильном источнике питания кривая  $B-H$  имеет симметричный обратный ход и сохраняет форму от периода к периоду.

Для внутрисхемного измерения напряжения на дросселе и тока, протекающего через его обмотку, можно использовать осциллограф. Зная число витков обмотки, магнитную длину устройства и площадь поперечного сечения сердечника, можно определить реальные значения  $B$  и  $H$  по формам напряжения и тока, измеренным с помощью осциллографа.

Для построения кривой  $B-H$  нужно измерить напряжение на индуктивном элементе и протекающий через него ток. В случае трансформатора интерес представляют токи, протекающие через первичную и вторичную обмотки. Высоковольтный дифференциальный пробник подключается к дросселю или к первичной обмотке трансформатора. Точковый пробник измеряет ток, протекающий через дроссель или первичную обмотку трансформатора. Кроме того, при необходимости токовые пробники используются для измерения токов, протекающих через вторичные обмотки.

На рисунке 5 показаны измерения трансформатора с несколькими вторичными обмотками. Кривая Ref 1 (в центре) представляет собой напряжение на дросселе, а кривая Ref 2 (снизу) – протекающий ток. В данном случае показана математически рассчитанная форма тока (сверху), поскольку осциллограф был настроен на измерение нескольких вторичных обмоток.

## Кривые В-Н для трансформаторов

Для измерения характеристик трансформатора в рабочих условиях нужно учесть ток, переданный во вторичную обмотку. Измеряя кривую В-Н трансформатора полезно учитывать теоретический элемент, называемый индуктивностью намагничивания.

Током намагничивания называется ток, протекающий через первичную обмотку трансформатора при разомкнутой (ненагруженной) вторичной обмотке. Другими словами, ток намагничивания не порождает ток во вторичной обмотке. Как показано на рисунке 6, трансформаторы моделируются с током намагничивания, протекающим через индуктивность намагничивания, включённую параллельно первичной обмотке. Индуктивность намагничивания  $L_m$  моделирует магнитные характеристики трансформатора.

### Анализ потерь

Потери в индуктивных компонентах дают существенный вклад в потери источника питания. Потери в сердечнике зависят от магнитных свойств материала и включают потери на гистерезис и потери на вихревые токи. Потери в меди связаны с сопротивлением обмоток, а также зависят от нагрузки, подключённой к вторичной обмотке трансформатора.

Для оценки потерь в сердечнике применяются разные методы. Один из наиболее популярных методов использует эмпирическую формулу Штейнмеца, которая связывает потери в сердечнике с частотой и магнитной индукцией:

$$P_{Core} = k \times f^a \times B^b,$$

где  $k$ ,  $a$  и  $b$  – константы, описывающие материал сердечника и обычно приведённые в техническом описании. Кроме того, в техническом описании могут приводиться приближенные значения потерь на разных частотах и для различных значений магнитной индукции, но, как правило, эти значения даются для синусоидальных сигналов. Однако в реальных системах питания компоненты обычно возбуждаются несинусоидальными сигналами, что порождает погрешность подобных оценок.

Для вычисления полных магнитных потерь путём усреднения произведения кривых напряжения и тока  $U(t) \times i(t)$  можно использовать осциллографическое приложение. При



**НАДЁЖНОСТЬ**  
**БЕЗОПАСНОСТЬ**  
**РЕАЛЬНОЕ ВРЕМЯ**

**Программно-аппаратные комплексы  
с операционной системой  
реального времени**

**QNX PROSOFT® ADVANTIX**

**PROSOFT®** | **ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПОСТАВЩИК**  
(495) 234-0636 • INFO@PROSOFT.RU • WWW.PROSOFT.RU



использовании этого метода рассчитываются полные магнитные потери, включающие потери в меди и в сердечнике. Пример такого расчёта показан на рисунке 7. Потери в сердечнике могут быть приведены в документации производителя. В этом случае можно найти потери в меди, вычтя потери в сердечнике из полных магнитных потерь.

Осциллографы могут рассчитывать магнитные потери дросселей с одной обмоткой, с несколькими обмотками

и даже трансформаторов. В случае трансформатора с одной обмоткой дифференциальный пробник используется для измерения напряжения на первичной обмотке. Токковый пробник измеряет ток, протекающий через трансформатор, затем программа измерения мощности может автоматически рассчитать магнитные потери.

Таким образом, имея под рукой нужные приборы, соответствующие измерения можно выполнить сравнительно быстро и легко.