

# Расчет потерь индуктора

## С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ Würth Elektronik's REDEXPERT

**Ранджи Браманпалли  
(Ranjith Bramanpalli)**

### Введение

В импульсных источниках питания (SMPS) большая часть рассеиваемой энергии приходится на потери переключения и магнитные потери, которые генерируются в сердечнике и обмотках индукторов. Точное определение их величины становится все более важным для разработки надежных и эффективных систем, особенно в эпоху «зеленых» технологий. Оценка потерь в сердечнике дросселя SMPS может потребовать применения сложных измерительных установок, однако она не гарантирует учета особенностей конкретного применения. Исторически потери в сердечнике рассчитываются с помощью уравнений Штейнмеца (Steinmetz), которые в последнее время получили широкое распространение. Эти выражения способны давать достоверный результат только при определенных условиях применения и для определенных материалов. Поэтому компания Würth Elektronik eiSos разработала новую модель, позволяющую эффективно и точно определять потери в сердечнике. Она реализована в новом онлайн-инструменте REDEXPERT.

### Накопление энергии в магнетиках

В импульсном источнике питания индуктор работает как элемент хранения. В ходе цикла коммутации он накапливает энергию в виде магнитного поля в течение периода включения и доставляет ее в нагрузку во время отключения. Как правило, индуктор состоит из обмотки, обычно изготавливаемой из медного провода, и сердечника, обладающего магнитными свойствами. С точки зрения электромагнитной физики, когда магнитодвижущая сила воздействует на катушку в течение некоторого времени, это создает магнитный поток  $\mathcal{O}(t)$ . Важным моментом является то, что в любой точке магнитной индукция  $B$  всегда пропорциональна напряженности поля  $H$ :

$$B(t) = \mu_r \mu_o H(t),$$

где  $B$  — магнитная индукция ( $\mathcal{O}/A$ );  $\mu_r$  — проницаемость материала;  $\mu_o$  — проницаемость воздуха;  $H$  — напряженность магнитного поля.

Обмотка наматывается вокруг или размещается внутри сердечника с воздушным зазором для получения эффективного магнитного поля.

Сердечник, содержащий воздушный зазор, обычно изготавливается из ферритового материала, обладающего ферромагнитными свойствами и имеющего гораздо более высокую проницаемость, чем воздух. Следовательно, зазор является элементом с высоким магнитным сопротивлением и расположен последовательно за ферритовым материалом с низким магнитным сопротивлением. Таким образом, основная часть энергии концентрируется в воздушном зазоре.

Индуктивности работают в соответствии с законами Ампера и Фарадея. Закон Ампера связывает ток в катушке или витке проводника с величиной магнитного поля в сердечнике индуктора. Приближенно можно считать, что магнитное поле в сердечнике равномерно распределено по всей его длине ( $l_e$ ). Это предположение позволяет сформулировать закон Ампера в следующем виде:

$$H \times l_e = N \times I,$$

где  $N$  — количество витков в катушке;  $I$  — ток индуктора.

В соответствии с законом Фарадея, напряжение на индукторе рассчитывается по формуле

$$V(t) = N \times \frac{d\phi}{dt} \text{ (or)} V = L \times \frac{dI}{dt},$$

$$L = \mu \times \frac{A_c \eta^2}{l_e},$$

где  $A_c$  — площадь сечения сердечника.

Поскольку ферритовые материалы обладают высокой проницаемостью, в них с легкостью распространяется магнитный поток (низкое магнитное сопротивление). Это свойство помогает сосредоточить поток внутри сердечника, что, в свою очередь, позволяет создавать индукторы с высокой индуктивностью и небольшим размером. Из выражения для  $L$ , приведенного выше, видно, что использование материала сердечника с высоким значением проницаемости позволяет уменьшить площадь поперечного сечения.

В дросселе SMPS пиковое значение магнитной индукции может быть определено следующим образом:

$$B_{pk} = \frac{L}{N \times A_c} \times \frac{di}{dt}.$$

Связанные индуктивности (например, в обратноходовых трансформаторах) также являются индукторами, содержащими несколько обмоток. Они могут иметь ряд специфических особенностей, но основные свойства сердечника остаются неизменными.

**Потери мощности**

Потери мощности в индукторе генерируются обмотками и сердечником, поэтому следует различать потери в обмотках и потери в сердечнике.

**Потери в обмотках**

Рассеяние мощности в обмотках происходит из-за наличия у них омического сопротивления ( $R_{DC}$ ), скин-эффекта и эффекта близости. Активная мощность рассеяния рассчитывается с помощью выражения  $P \times R_{DC}$ .

Потери, вызванные скин-эффектом и эффектом близости, можно рассматривать как потери на AC-сопротивлении ( $R_{AC}$ ) обмотки, которые в основном зависят от рабочей частоты. Существует несколько способов для оценки данных эффектов в магнетиках, но это требует выполнения сложных процедур, например с использованием метода Доуэля (Dowell).

**Потери в сердечнике**

Зависимость индукции  $B$  от  $H$  является нелинейной и гистерезисной, отсюда и происходит название «петля гистерезиса». Гистерезис является одной из характеристик материала сердечника, создающей в нем потери мощности. Типовая кривая  $B-H$  при условии синусоидального возбуждения показана на рис. 1.

Потери, вызванные изменением магнитной энергии в сердечнике во время цикла переключения, равны разнице между магнитной энергией, поступающей в сердечник во время включения и выходящей из него во время отключения.

С помощью законов Ампера и Фарадея энергия в сердечнике может быть выражена с помощью интеграла

$$E = \int HdB.$$

Потери энергии в сердечнике представляют собой область петли в пределах  $B-H$ , умноженную на объем сердечника. Потери мощности рассчитываются как произведение энергии ( $E$ ) на частоту коммутации.

Это выражение применимо при условии, что сердечник не уходит в область насыщения, а частота переключения лежит в заданном рабочем диапазоне. Часть площади петли гистерезиса (красная область, см. рис. 1) представляет собой потери энергии. Потери мощности зависят от того, сколько раз в секунду петля гистерезиса пересекает оси координат, таким образом, гистерезисные потери зависят от частоты.

Кроме того, потери в сердечнике возникают из-за вихревых токов, которые наводятся в нем за счет изменяющегося во времени потока  $d\Phi/dt$ . Согласно закону Ленца, изменение потока индуцирует ток, который, в свою очередь, создает поток, противоположный начальному. Вихревой ток течет в проводящем материале сердечника и генерирует там активные потери  $I^2R$ .

**Расчет потерь**

Традиционно потери в сердечнике рассчитываются с помощью выражения, также называемого уравнением Штейнмеца (Steinmetz):

$$P_v = K \times f^\alpha \times B_{pk}^\beta,$$

где  $P_v$  — это потери в сердечнике (за счет гистерезиса и вихревых токов) на единицу объема;  $f$  — частота;  $B_{pk}$  — пиковое значение индукции при синусоидальном возбуждении;  $K$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  — константы, получаемые из кривой потерь, показанной на рис. 2.

Данные, приведенные на рис. 2, обычно включают влияние гистерезиса и вихревых токов. Непосредственно изменить потери в сердечнике трудно, поскольку для этого требуются сложные установки для

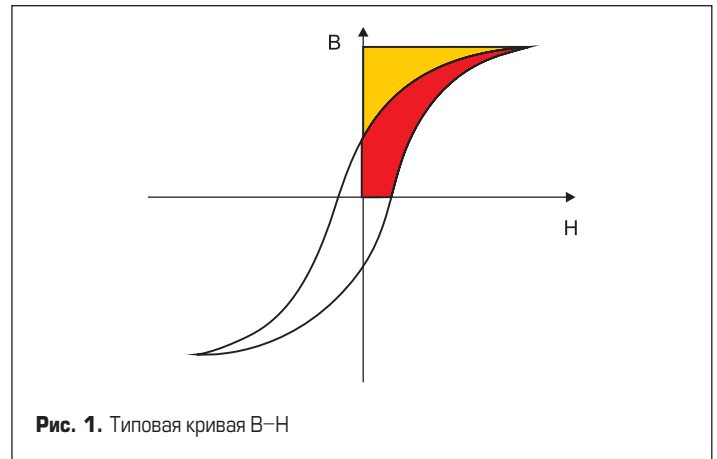


Рис. 1. Типовая кривая B-H

измерения индукции и потому что они предполагают оценку различных областей петли гистерезиса. Для построения этих кривых синусоидальный сигнал подается на тороидальный (кольцевой) сердечник с одной или двумя обмотками по первому витку, после чего снимаются различные показатели, необходимые для построения диаграмм потерь в сердечнике. Далее производится вычисление констант с помощью графика на рис. 2.

Основной проблемой использования уравнения Штейнмеца является то, что оно в основном справедливо при условии синусоидального возбуждения. Это огромный недостаток, поскольку в большинстве реальных электронных схем поток в индукторе имеет несинусоидальную форму. Существуют и другие модели, в которых гистерезисные потери и потери на вихревые токи разделены, что необходимо для решения проблемы несинусоидальных сигналов. Однако эмпирическое уравнение Штейнмеца является наиболее проверенным, что позволяет ему быть самым полезным инструментом для случая синусоидального потока, где оно обеспечивает лучшую точность и простоту использования. Поэтому для данного уравнения созданы расширения, допускающие его применение для потоков несинусоидальной формы.

Чтобы выражение Штейнмеца было применимо для оценки потерь в сердечнике при несинусоидальном потоке, широко используется расширение, называемое «модифицированное уравнение Штейнмеца», или MSE (2):

$$P_v = (K \times f_{eq}^{\alpha-1} \times B_{pk}^\beta) \times f,$$

где  $f_{eq}$  — эквивалентная частота с учетом изменений рабочего цикла (DC) при несинусоидальном сигнале:

$$f_{eq} = \frac{f}{2\pi \times (DC - DC^2)}.$$

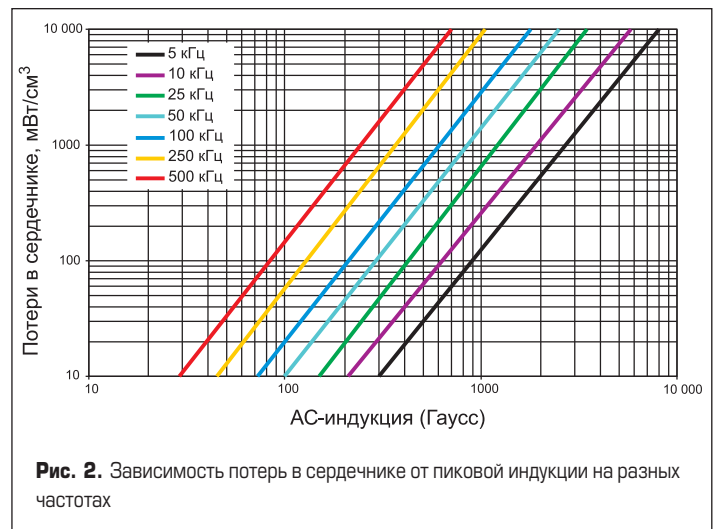


Рис. 2. Зависимость потерь в сердечнике от пиковой индукции на разных частотах

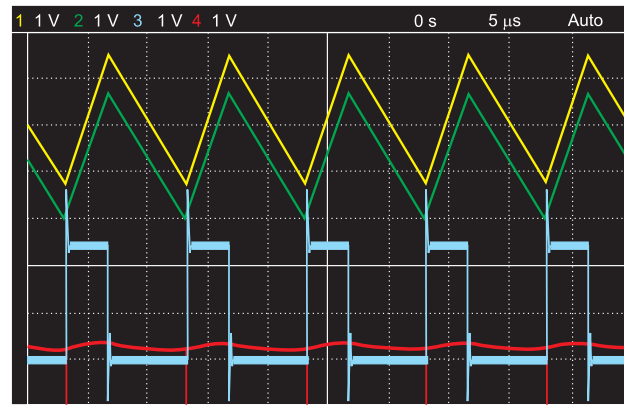
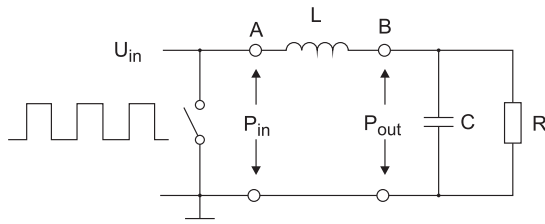


Рис. 3. Эквивалентная схема DC/DC-конвертера для расчета потерь и результирующие формы сигналов

Вследствие того что выражение MSE имеет некоторые недостатки, позже было выведено обобщенное уравнение Штейнмеца (GSE):

$$P_v = K \times f_{eq}^a \times B_{pk}^b,$$

где  $B_{eq} = \frac{1}{4} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right| dt$ .

Поскольку диаграммы потерь в сердечнике GSE и MSE также основаны на синусоидальном возбуждении, существуют некоторые ограничения, которые будут рассмотрены далее. Есть также некоторые другие модели, созданные производителями магнетиков, однако они хорошо работают только с сердечниками, выпускаемыми ими.

Основные недостатки модели Штейнмеца и ее расширений:

- зависимость от эмпирических данных производителя сердечника (для построения диаграмм потерь), пользователь не имеет никакого контроля над испытательной установкой;
- низкая точность при пульсирующих и треугольных формах сигналов вследствие того, что графики потерь строятся на основе данных, полученных при синусоидальном возбуждении;
- из-за ошибки в конвертации параметров расширение моделей Штейнмеца работает только при 50% коэффициенте заполнения и в ограниченном частотном диапазоне;
- распространяется только на компоненты, сделанные из определенных материалов или определенными производителями;
- из-за сложности определения длины магнитного пути оценка потерь в сердечнике при использовании существующих моделей для железных порошковых материалов и металлических сплавов является не только сложной, но и неточной;
- из-за временных изменений индукции возникают потери в обмотках, вызванные скин-эффектом, эффектом близости и т. д., однако перечисленные выше методики не учитывают AC-потери в обмотках;
- невозможно оценить потери в сердечниках, выполненных из нескольких материалов;
- сложность установок для получения точных эмпирических данных.

### Модель AC-потерь Würth Elektronik

Компания Würth Elektronik eiSos разработала современную модель, позволяющую заказчикам эффективно выбрать индуктор и оптимизировать параметры системы. Она базируется на эмпирических данных, полученных на реальной схеме в режиме реального времени.

В модели Würth Elektronik eiSos суммарные потери индуктора разделены на две отдельные AC- и DC-составляющие. Рассеяние мощности при протекании постоянного тока в обмотках рассматривается как DC-потери. Дополнительные потери мощности, вызванные изменениями AC-потока в катушке и сердечнике, определяются как AC-потери.

DC/DC-преобразователь, показанный на рис. 3, используется для получения эмпирических данных. На индуктор подается пульсирующее напряжение, и производится измерение входной мощности  $P_{in}$  и выходной мощности  $P_{out}$  вычисляется мощность потерь  $P_{Loss} = P_{in} - P_{out}$ , после чего отделяются AC-потери в индукторе  $P_{AC}$ . Этот процесс повторяется с учетом широкого диапазона параметров, включая изменения пикового значения индукции, рабочей частоты, пульсаций тока и т. д. для получения эмпирических данных. Затем они используются при создании уравнения для расчета AC-потерь в следующем виде:  $P_{AC} = f(\Delta I, freq, DC, k1, k2)$ .

Гистерезисные петли, характерные для типовых магнитных материалов, отражают перегрузку сердечника в режиме синусоидального сигнала в пределах от + до – насыщения, а площадь гистерезисной кривой представляет потери энергии (рис. 4а). Такой же подход используется для получения эмпирических данных при построении диаграммы потерь в сердечнике, как показано на рис. 2.

Однако в индукторах реальных импульсных источников питания на сердечнике обычно наблюдается гораздо меньший прямоугольный сигнал с пиковой индукцией, ограниченной потерями в сердечнике с малой петлей гистерезиса (рис. 4б). Потери мощности зависят от того, сколько раз в секунду петля гистерезиса пересекает координатные оси. Таким образом, гистерезисные потери зависят от частоты. Петля гистерезиса изменяет форму в соответствии с изменениями формы тока или напряжения, а также температуры. Эта изменчивость очень затрудняет точные предсказания потерь в сердечнике. Малая площадь петли за-

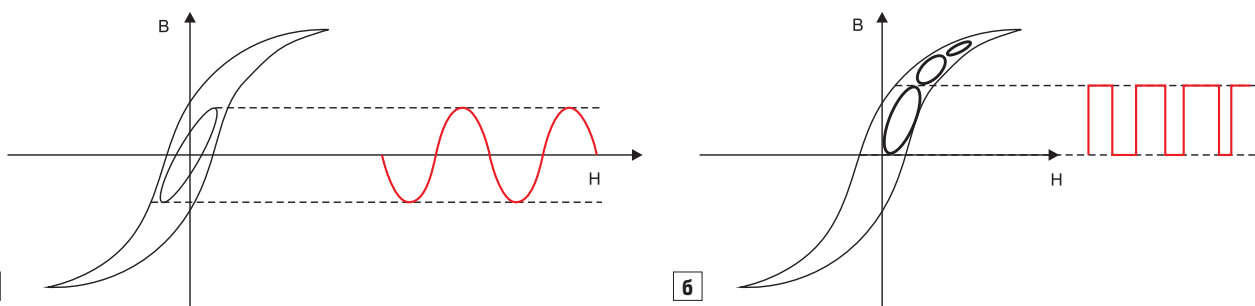


Рис. 4. а) Моделирование с использованием выражения Штейнмеца и его расширений; б) модель Würth Elektronik на основе рабочей точки

висит от напряжения на индукторе, она соответствует рабочей точке и используется Würth Elektronik для получения эмпирических данных для создания модели AC-потерь. Этот подход оказался очень надежным и точным в широком диапазоне таких параметров, как частота, пульсации тока и коэффициент заполнения.

Преимущества модели AC-потерь Würth Elektronik:

- эмпирические данные основаны исключительно на параметрах реального времени с точной оценкой потерь для любого заданного коэффициента заполнения;
- модель обеспечивает высокую точность в широком диапазоне частот (10 кГц...10 МГц), поскольку константы уравнения мощности потерь получены для широкого диапазона изменения потока;
- модель учитывает даже небольшие изменения материала сердечника и структуры обмотки;
- модель пригодна для сердечников, выполненных более чем из одного материала;
- модель точно оценивает потери сердечников из железного порошка и металлических сплавов;
- модель пригодна для любой формы сердечника и структуры обмотки;
- модель включает AC-потери обмотки.

### Представление модели AC-потерь Würth Elektronik

Модель Würth Elektronik была тщательно проверена, и было выполнено ее сравнение с существующими моделями на основе результатов измерений. Потери на переменном токе для различных материалов, таких как WE-Superflux, порошок Fe, NiZn, MnZn и т. д., были из-

мерены в широком диапазоне коэффициентов заполнения, частот и других параметров, и было проведено их сравнение с теоретическими моделями (рис. 5–9).

На приведенных ниже диаграммах параметры  $P_{st}$ ,  $P_{mse}$ ,  $P_{gse}$  представляют собой потери в сердечнике, полученные с помощью уравнения Штейнмеца, модифицированного уравнения Штейнмеца и обобщенного

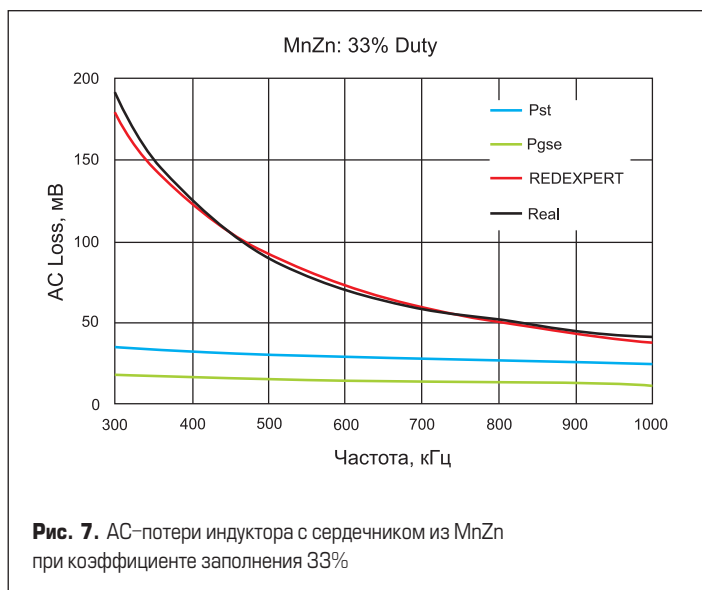


Рис. 7. AC-потери индуктора с сердечником из MnZn при коэффициенте заполнения 33%

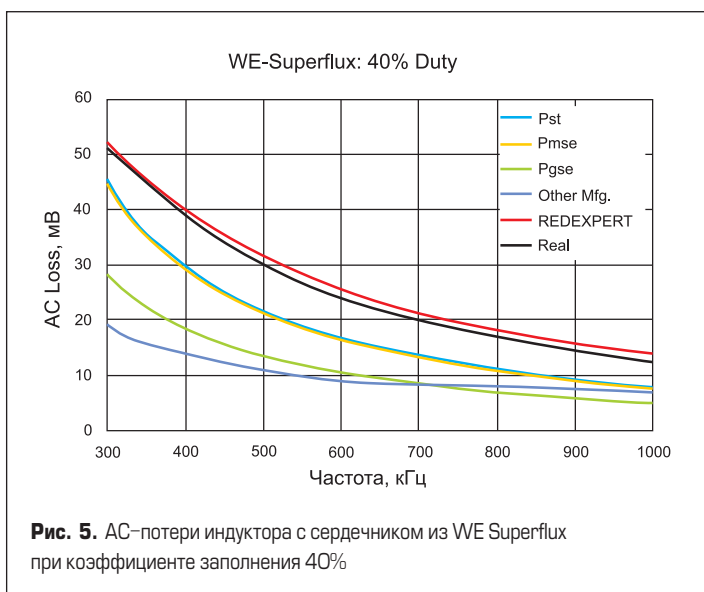


Рис. 5. AC-потери индуктора с сердечником из WE Superflux при коэффициенте заполнения 40%

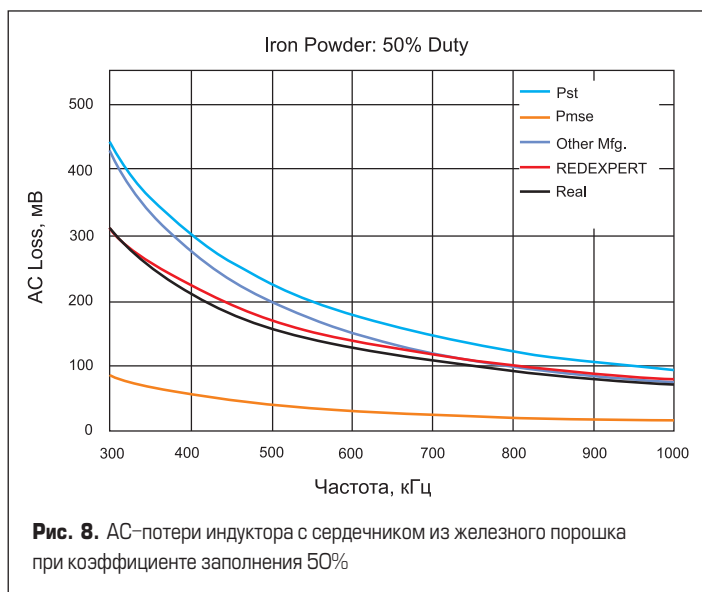


Рис. 8. AC-потери индуктора с сердечником из железного порошка при коэффициенте заполнения 50%

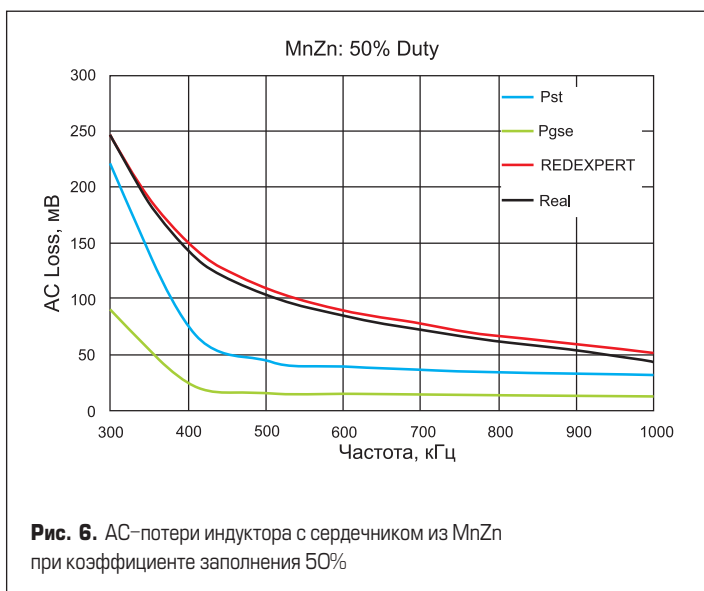


Рис. 6. AC-потери индуктора с сердечником из MnZn при коэффициенте заполнения 50%

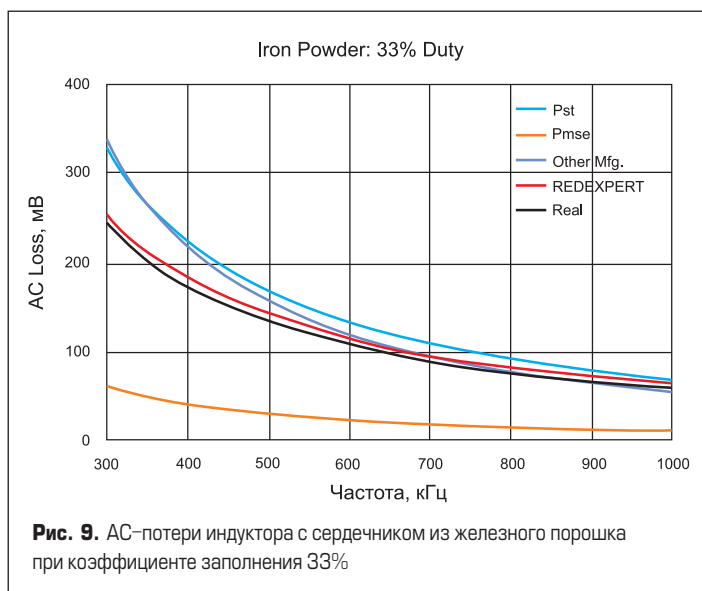


Рис. 9. AC-потери индуктора с сердечником из железного порошка при коэффициенте заполнения 33%



Рис. 10. Скриншот онлайн-программы REDEXPERT

уравнения Штейнмеца соответственно. Программа REDEXPERT предназначена для расчета AC-потерь с использованием модели Würth Elektronik. Также показаны измеренные значения потерь переменного тока.

**Расчет потерь индуктора с помощью REDEXPERT**

Новый онлайн-сервис REDEXPERT компании Würth Elektronik, предназначенный для выбора и моделирования режимов, позволяет пользователю найти подходящий элемент для конкретного применения. Простой и эффективный инструмент, REDEXPERT дает возможность разработчику за короткое время сравнить различные варианты и выбрать соответствующий индуктор. После ввода входных и выходных параметров, а также требуемой топологии схемы программа REDEXPERT производит расчет величины индуктивности и предлагает варианты. Скриншот веб-инструмента REDEXPERT показан на рис. 10.

Поскольку компания Würth Elektronik eiSos предлагает широкий спектр различных индукторов, существует высокая вероятность того, что пользователю будут предложены подходящие варианты. Разработчик может выбрать индуктор нужного размера с параметрами, соответствующими конкретной задаче. Расчет AC-потерь в магнитных компонентах является критически важной и сложной проблемой,

однако программа REDEXPERT способна успешно с ней справиться, поскольку в ней использована новая AC-модель Würth Elektronik. Точный расчет AC-потерь позволяет оценить температуру компонента в заданных условиях с высокой точностью.

Пример расчета индуктора для понижающего DC/DC-конвертера показан на рис. 11. Выбраны следующие режимы работы: входное напряжение 8–12 В, выходное напряжение 5 В, частота переключения 800 кГц, коэффициент заполнения 40%, выходной ток 1 А. Программа REDEXPERT определила оптимальную величину индуктивности  $L_{opt} = 9,6 \text{ мкГн}$ , длительность импульса тока  $T_{on} = 550 \text{ нс}$ , коэффициент заполнения  $DC = 0,44$ ; выбор был сделан из 200 возможных вариантов. Предположим, что для нашего применения требуется миниатюрный индуктор с низкими потерями. В таком случае возможным выбором является элемент серии WE-MAPI.

Действующая версия REDEXPERT предлагает расчет для трех топологий схем: понижающий DC/DC-конвертер, повышающий DC/DC-конвертер и универсальный преобразователь SEPIC. Во всех случаях пользователь может выбрать оптимальный компонент для конкретных условий. Кроме того, имеется калькулятор потерь для одной индуктивности, независимо от топологии. REDEXPERT — это онлайн-инструмент, поэтому пользователю не надо беспокоиться о загрузке, установке и обновлениях.

**Заключение**

Модель AC-потерь Würth Elektronik предлагает точную и практичную основу для расчета потерь переменного тока. Она была экспериментально проверена в широком диапазоне частот, токов пульсаций, коэффициентов заполнения и доказала свою эффективность. Поскольку эта модель AC-потерь реализована в программе REDEXPERT, пользователю не требуется информация о потерях в сердечнике. Таким образом, REDEXPERT является надежным инструментом для онлайн-расчета, позволяющим разработчику сэкономить время, необходимое для расчета мощности потерь и выбора оптимального компонента.

**Литература**

1. Magnetics Design for Switching Power Supplies by Lloyd H. Dixon.
2. On the law of hysteresis by C.P. Steinmetz.
3. Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation / J. Reinert, A. Brockmeyer, R.W. De Doncker.
4. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms / Li Jie, T. Abdallah, C.R. Sullivan.
5. [www.we-online.com/app-notes](http://www.we-online.com/app-notes)
6. [www.we-online.com/component-selector](http://www.we-online.com/component-selector)
7. [www.we-online.com/toolbox](http://www.we-online.com/toolbox)
8. [katalog.we-online.de/en/](http://katalog.we-online.de/en/)



Рис. 11. Пример расчета понижающего DC/DC конвертера