

# ВЫСОКОТОЧНЫЙ РАСЧЕТ СИЛОВОГО ДРОССЕЛЯ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

**АЛЕКСАНДР ГЕРФЕР (ALEXANDER GERFER),  
РАНЖИТ БРАМАНПАЛЛИ (RANJITH BRAMANPALLI),  
ДЖОКЕН БАЙЕР (JOSCHEN BAIER)**

*В статье рассматриваются возможности нового средства REDEXPERT от компании Würth Elektronik, которое позволяет с высокой точностью определить потери мощности по постоянному и переменному токам в силовых дросселях для широкого ряда приложений.*

## ВВЕДЕНИЕ

Энергоэффективные устройства позволяют экономно расходовать ресурсы и защищать окружающую среду. Чем эффективнее работают, например, мобильные электронные устройства, тем дольше срок службы их аккумуляторов. К промышленным системам и серверам, которые обслуживают тысячи потребителей, требования к энергоэффективности заметно мягче.

Основу энергоэффективного устройства составляет модуль источника питания. В современных электронных устройствах, главным образом, используются импульсные источники питания, что в т. ч. обусловлено уменьшением напряжения питания процессоров. Если несколько лет тому назад величина коммутационной частоты достигала 300 кГц, то к настоящему времени импульсные контроллеры работают с тактовой частотой 800 кГц и выше. При проектировании модулей импульсных источников питания следует учитывать не только коммутационные потери, но и потери в силовом дросселе.

Благодаря новым железным сплавам удалось в еще большей мере сократить потери в материалах силовых дросселей. WE-MAPI – серия дросселей (см. рис. 1), в которых благодаря удачному подбору материалов и технологии изготовления обеспечивается оптимальная индуктивность и допустимая нагрузка по току с малыми внутренними потерями.

Новое средство под названием REDEXPERT позволяет разработчикам



Рис. 1. Внешний вид дросселя WE-MAPI и его обмотки, которая соединяется с контактными площадками без пайки или сварки

предварительно определить потери по постоянному и переменному токам в силовых дросселях в условиях эксплуатации конкретного приложения. Заметим, что возможность осуществлять расчеты потерь с помощью уравнений Штейнмеца очень скоро будут исчерпаны.

## КОНСТРУКЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ WE-MAPI

WE-MAPI – инновационная серия дросселей от компании Würth Elektronik. В стандартных дросселях, главным образом, применяется медная проволока с эмалевым покрытием, намотанная

вокруг сердечника и припаянная к выводу с зажимом. Внешнее экранирующее кольцо устанавливается и крепится к внутреннему сердечнику и обмотке.

Новизна компонентов серии WE-MAPI заключается в том, что их обмотка соединяется с контактными площадками без использования пайки или сварки. Благодаря зажимному соединению эффективный диаметр обмотки можно увеличивать, что позволяет сократить число витков обмотки при той же величине индуктивности. В результате значительно уменьшается сопротивление обмотки по постоянному току  $R_{DC}$ .

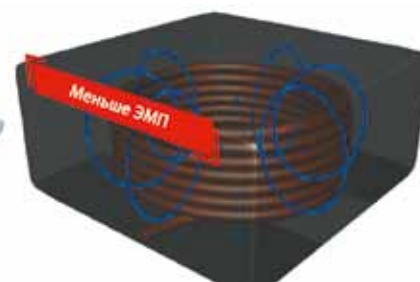


Рис. 2. Самозащищающаяся обмотка и новая конструкция сердечника позволяют улучшить параметры ЭМП дросселей серии WE-MAPI

Начало обмотки дросселя, как правило, подключается к коммутационному узлу импульсного преобразователя, на что указывает маркировка на компоненте. Соответственно, минимизируется влияние помех от активного коммутационного узла, и экранируются наводки через внешнюю часть обмотки, которая подключается к точке с «устойчивым» потенциалом (см. рис. 2).

Сердечник изготовлен из спрессованного металлического сплава, расположенного вокруг обмотки. В результате дроссели серии WE-MAPI в компактном корпусе обладают большой индуктивностью. В то же время конструкция сердечника обеспечивает самоэкранирующий эффект. Материал сердечника обладает термоустойчивостью при незначительном дрейфе и плавной характеристикой насыщения. У сердечника имеется защитный слой, который обеспечивает устойчивость поверхности к воздействию окружающей среды.

Дроссели серии WE-MAPI выпускаются во многих разных корпусах размерами 1,6×1,0; 2,0×1,0; 2,5×0,6; 2,5×0,8; 2,5×1,0; 2,5×1,2; 3,0×1,2; 3,0×1,5; 3,0×2,0; 4,0×2,0 мм.

### ПОТЕРИ В СИЛОВЫХ ДРОССЕЛЯХ

Потери в силовых дросселях обусловлены потерями в материале сердечника и в обмотке. В свою очередь, потери в обмотке можно разделить на потери по постоянному току, связанные, в основном, с ее сопротивлением по постоянному току  $R_{DC}$  и определяемые как  $P = I^2 \cdot R_{DC}$ , и потери по переменному току на сопротивлении  $R_{AC}$ , возникающие в результате поверхностного эффекта и эффекта близости. Для определения потерь в обмотке по переменному току применяется несколько методов расчета, в т. ч. методы Дуэля, Феррейры или Салливана.

Влияние помех по переменному току на современные импульсные

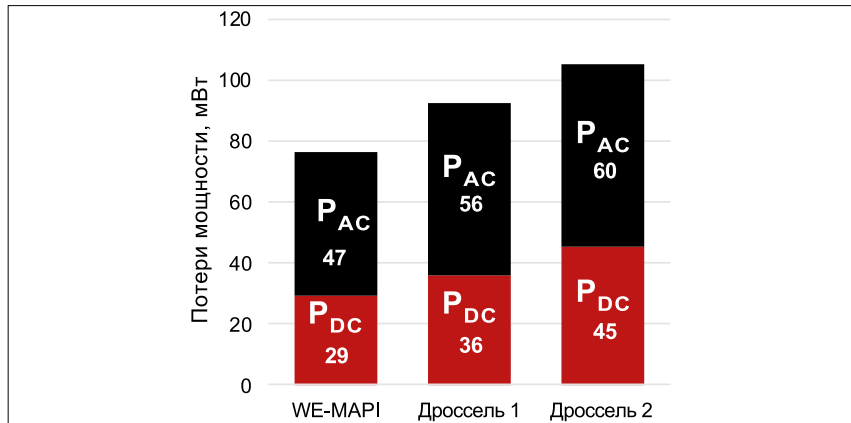


Рис. 3. Потери по переменному и постоянному токам дросселя с индуктивностью 2,2 мкГн, который используется в понижающем преобразователе с входным напряжением 24 В, выходным напряжением 12 В при токе 2 А и частоте 500 кГц

контроллеры можно определить с помощью простой измерительной установки. В качестве примера рассмотрим понижающий преобразователь с входным напряжением 24 В. На выходе его напряжение составляет 12 В при токе 2 А. Тактовая частота – 500 кГц. На рисунке 3 сравниваются потери мощности в силовом дросселе с индуктивностью 2,2 мкГн серии WE-MAPI 4020 с силовыми дросселями в корпусах того же типоразмера. Очевидно, что потери по переменному току превышают потери по постоянному току.

Дроссель – один из наиболее важных компонентов импульсного контроллера. Точное определение потерь и нагрева дросселя – необходимая мера при выборе компонента. Чтобы определить величину этого нагрева, в первую очередь, следует точно установить величину потерь по переменному току.

### МОДЕЛИ ШТЕЙНЦЕЦА

Если следовать хронологии, то потери в сердечнике сначала определялись с помощью модели Штейнцелца (1), позже – с помощью модифицированной модели Штейнцелца (2) или его обобщенной модели (3):

$$P_V = K \cdot f^\alpha \cdot B_{pk}^\beta, (1)$$

$$P_V = (K \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot B_{pk}^\beta) \cdot f$$

$$\text{при } f_{eq} = \frac{f}{2\pi(DC - DC^2)}, (2)$$

$$P_V = (K \cdot f_{eq}^\alpha \cdot B_{eq}^\beta) \cdot f$$

$$\text{при } B_{eq} = \frac{1}{4} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right| dt, (3)$$

где  $P_V$  – потери мощности на единицу объема;  $f$  – частота коммутации;  $B_{pk}$  – синусоидальная модуляция магнитного поля;  $f_{eq}$  – эквивалентная частота несинусоидальной модуляции при изменяющемся коэффициенте заполнения;  $K$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  – константы материала сердечника, определяемые путем измерений с использованием кольцевого сердечника.

Существенным недостатком уравнения Штейнцелца является то, что оно исходит из синусоидальной формы тока, а коэффициенты определяются, как правило, только на основе измерения малых сигналов. Однако в большинстве приложений силовой электроники ток в дрос-

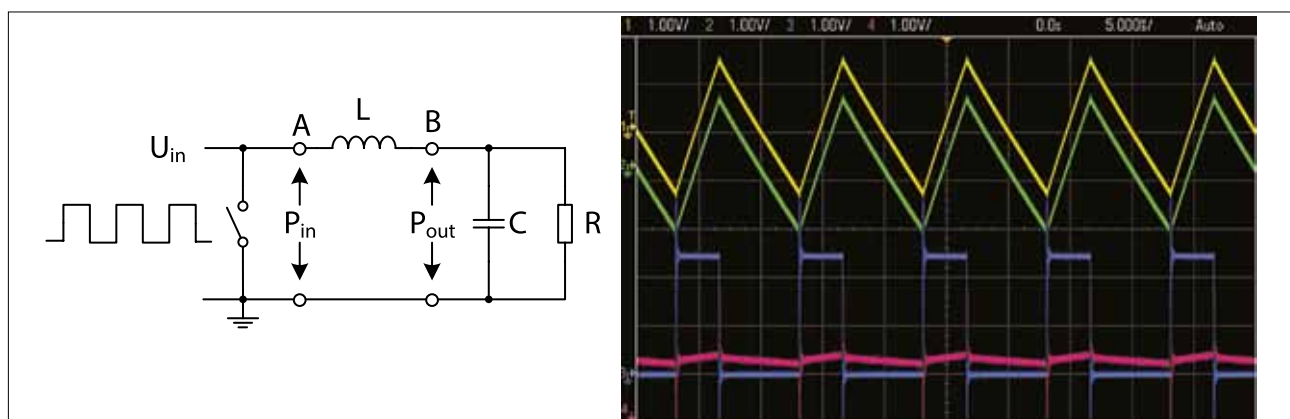


Рис. 4. Схема DC/DC-преобразователя для определения потерь мощности и соответствующие результаты на экране осциллографа

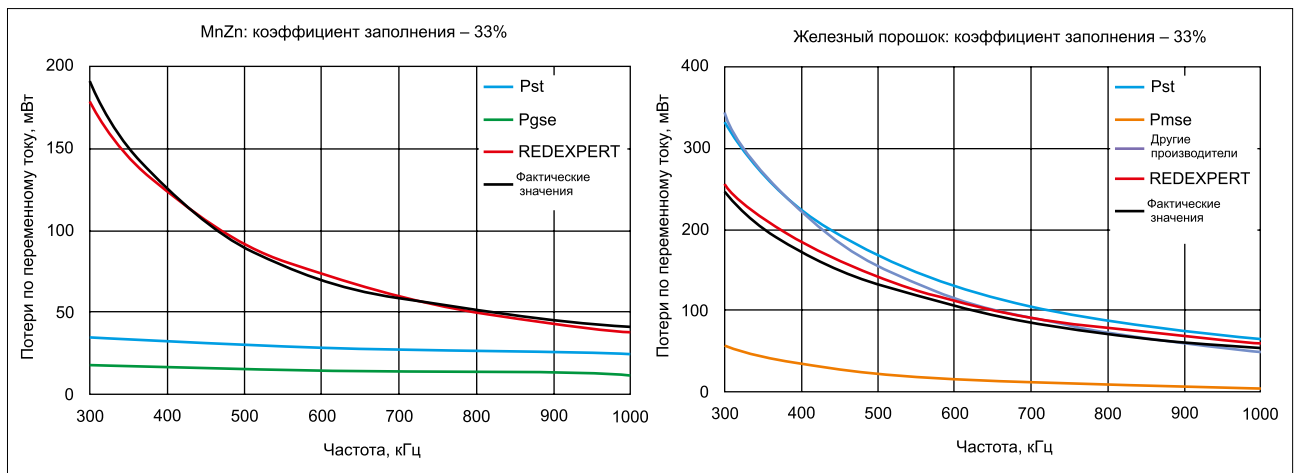


Рис. 5. Дроссель с сердечником из MnZn и железного порошка при коэффициенте заполнения 33%

селях не имеет синусоидальной формы и принимает значения в диапазоне от нескольких мА до нескольких сотен А.

Существуют и другие способы моделирования, которые позволяют решить проблему с несинусоидальными сигналами путем разделения гистерезисных потерь и потерь от вихревых токов. В таких случаях эмпирическое уравнение Штейнмеца доказало свою практическую пригодность, но оно обеспечивает высокую точность результатов только для синусоидальных токов. Разные модели Штейнмеца дают хорошие результаты лишь при значениях коэффициента заполнения равного 50% и в ограниченном частотном диапазоне. Кроме того, из-за достаточно сложной процедуры определения длины пути магнитного потока требуется установить потери в сердечнике с помощью имеющихся уравнений для железного порошка и металлических сплавов; при этом точность результатов невелика. В случае же с дросселями, у которых сердечники изготовлены из нескольких разных материалов, определение потерь часто не представляется возможным.

**МОДЕЛЬ ОТ КОМПАНИИ WÜRTH ELEKTRONIK**

Компания Würth Elektronik eiSos создала собственную модель для точного определения потерь в сердечнике по переменному току. Эта модель основана на эмпирических данных, полученных с помощью экспериментальной установки. В таком представлении потери делятся на потери по постоянному и переменному токам.

Эмпирические данные были получены с помощью DC/DC-преобразователя (см. рис. 4). На дроссель подавалось импульсное напряжение, после чего измерялась входная  $P_{IN}$  и выходная мощности  $P_{OUT}$ . Мощность потерь  $P_{LOSS} = P_{IN} - P_{OUT}$ , а потери дросселя по переменному току  $P_{AC}$  рассчитывались отдельно. Такой метод используется для измерения разных параметров – изменений модуляции магнитного потока, частоты коммутации, тока пульсаций и т.д. С помощью этих эмпирических данных создается модель для расчета потерь мощности по переменному току:  $P_{AC} = f(\Delta I, \text{частота, DC, } k1, k2)$ .



Рис. 6. Моделирование понижающего преобразователя с помощью средства REDEXPERT с использованием компонентов WE-MAPI

Перечислим преимущества модели Würth Elektronik для расчета потерь по переменному току:

- эмпирические данные получены с помощью DC/DC-преобразователя;
- обеспечивается точное определение потерь для каждого заданного коэффициента заполнения;
- обеспечивается высокая точность в широком частотном диапазоне 10 кГц...10 МГц;
- учитываются все малейшие изменения в материале сердечника и конструкции обмотки;
- можно рассчитывать параметры компонентов, изготовленных не из одного материала;
- обеспечивается высокая точность по определению потерь в компонентах из железного порошка и металлических сплавов;
- имеется возможность рассчитывать сердечник любой конструкции и с разными структурами обмотки;
- имеется возможность рассчитывать потери в обмотке по переменному току.

### ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИ ОТ WÜRTH ELEKTRONIK

Работоспособность модели от компании Würth Elektronik была подтверждена многочисленными испытаниями, по результатам которых ее сравнивали с другими моделями и полученными данными. Измерялись потери по переменному току для таких материалов как WE-Superflux, железный порошок, NiZn, MnZn и т. д. при изменении коэффициента заполнения в широком диапазоне значений и широком частотном диапазоне. Результаты сравнивались с теми, которые были получены с помощью теоретических моделей (см. рис. 5).

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВА REDEXPERT

REDEXPERT – новое интерактивное средство проектирования от Würth Elektronik eiSos, позволяющее выбрать силовой дроссель для конкретного приложения. С помощью этого эффективного и простого в использовании средства можно сравнивать разные компоненты и выбирать их за очень короткое время.

С этой целью сначала вводятся входные и выходные параметры для требуемой топологии, а затем средство REDEXPERT рассчитывает необходимое значение индуктивности и отображает соответствующие компоненты. На рисунке 6 показан скриншот окна REDEXPERT.

Расчет потерь по переменному току в магнитных компонентах достаточно трудоемок, но средство REDEXPERT намного его упрощает благодаря интегрированной модели Würth Elektronik, которая позволяет точно определить температуру изделия.

В настоящее время средство REDEXPERT поддерживает три топологии преобразователей: понижающую, повышающую и SEPIC. Величина потерь отражается в графическом виде во всем диапазоне входного напряжения, позволяя учесть даже экстремальные сценарии. Таким образом можно быстро подобрать большинство силовых дросселей для соответствующих приложений.

Чтобы определить параметры дросселя для понижающего преобразователя, в программу вводится диапазон значений входного напряжения, выходное напряжение и ток (см. рис. 7), а также значения коммутационной частоты, напряжения на диоде, а также требуемый уровень пульсации дросселя. После нажатия кнопки Display details на экране отображаются параметры соответствующего силового дросселя, в т. ч. значения токов пульсации и потерь.



Рис. 7. Определение параметров понижающего преобразователя и потерь соответствующего дросселя

Кроме того, у разработчиков имеется возможность воспользоваться калькулятором, который позволяет вручную рассчитать величину потерь силового дросселя независимо от топологии. С этой целью необходимо ввести в средство REDEXPERT значения коэффициента заполнения, тока пульсаций или падения напряжения. Входные данные мгновенно отображаются в графическом виде внизу экрана ввода.

Поскольку REDEXPERT – веб-средство, нет необходимости его загружать или обновлять. Зарегистрированные пользователи получают доступ к дополнительным функциям: например, у них имеется возможность определить, как изменяется индуктивность дросселя или температура в зависимости от тока.

### Выводы

Силовые дроссели серии WE-MAPI обеспечивают максимальную мощность при очень небольших размерах. Инновационный материал сердечника и его современная конструкция отвечают требованиям самых последних стандартов. Выбор дросселей WE-MAPI рекомендуется осуществлять с помощью средства REDEXPERT – нового интерактивного инструмента от компании Würth Elektronik. В этом средстве используется модель расчета потерь по переменному току, которая позволяет с очень высокой точностью получить частоту, ток пульсаций и коэффициент заполнения в широком диапазоне значений. □