

# Импедансный подход к анализу индуктивных компонентов

Александр Емельянов

С целью предотвращения применения на производстве комплектующих изделий, не соответствующих требованиям или низкого качества, на предприятии проводится входной контроль ЭРИ. Эта процедура является важной и ответственной задачей при производстве высококачественных модулей электропитания для ответственных сфер применения в компании ВОЛЬТБРИКС.

Классическим методом анализа параметров пассивных компонентов является использование измерителей RLC. Ключевым недостатком их использования является измерение параметров на одной конкретной частоте. При таком измерении высока вероятность попадания на нелинейный участок частотной характеристики импеданса, что приведёт к искажениям измеренных значений параметров ёмкости или индуктивности, а также активного сопротивления.

Одним из самых точных методов определения параметров пассивных компонентов является измерение их импеданса в широком диапазоне частот. Амплитудно- и фазочастотная характеристики покажут, на каком

участке частот компонент имеет резистивный, индуктивный и ёмкостный характер, позволят визуально выбрать допустимую частоту для анализа и определить интересующий параметр.

На примере индуктивного компонента рассмотрим, какую информацию о нём несёт его импеданс. Покажем математическую основу метода и приведём практический пример измерения на одном из популярных дросселей – IHLP4040DZER4R7M11.

## Часть I: Теоретическая основа импедансного метода. Дроссель как физический компонент

Дроссели как физические компоненты представляют собой некоторое сопро-

тивление, индуктивность и ёмкость. Их можно описать следующей схемой замещения, являющейся моделью с определёнными параметрами (рис. 1).

В диапазоне частот  $f \in [0 \dots \frac{R}{2\pi L}]$  импеданс дросселя образует активное сопротивление или сопротивление потерь.

$$\begin{aligned} |Z(f)| &= R \\ \varphi(f) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

В данном диапазоне частот импеданс имеет резистивный характер, сдвиг фаз между током и напряжением равен нулю. Частоту  $f = \frac{R}{2\pi L}$  можно считать минимальной частотой использования дросселя.

В диапазоне частот  $f \in [\frac{R}{2\pi L} \dots \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}]$  импеданс дросселя образует реактивное сопротивление индуктивности:

$$\begin{aligned} |Z(f)| &= 2\pi \cdot f \cdot L, \\ \varphi(f) &= \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

В данном диапазоне частот в импедансе дросселя преобладает индуктивная составляющая, напряжение опережает по фазе ток на  $\frac{\pi}{2}$  радиан.

На частотах выше  $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  импеданс дросселя образует реактивное сопротивление паразитной ёмкости компонента

$$|Z(f)| = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}, \quad (3)$$

$$\varphi(f) = -\frac{\pi}{2}.$$

В данном диапазоне частот импеданс имеет ёмкостный характер, напряжение запаздывает по фазе относительно тока на радиан. Частоту  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  можно считать максимальной частотой использования дросселя.

## Динамика изменения индуктивности от протекающего тока. Насыщение

Работу любого дросселя, выполненного из магнитного материала, можно описать кривой намагничивания – зависимостью индукции магнитного поля от магнитной напряжённости (рис. 2).

Достижение индукции насыщения  $B_H$  означает, что энергия, передаваемая полем через площадь магнитопровода, достигла максимума, и магнитный поток  $\Phi = L \cdot I$  в точке насыщения не может стать больше. С увеличением силы тока  $I$  уменьшается индуктивность  $L$ .

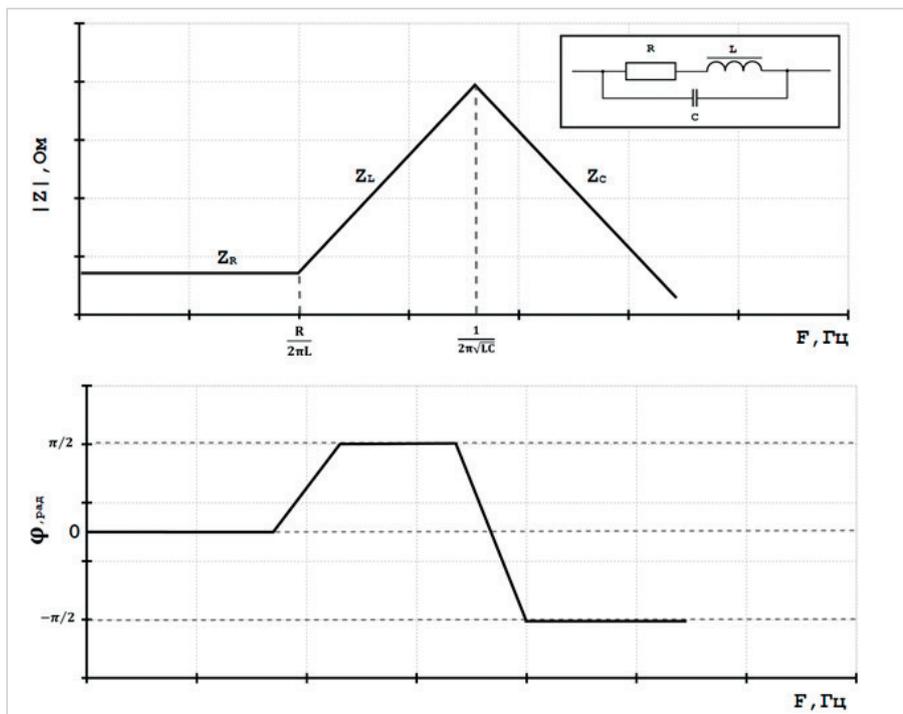


Рис. 1. Амплитудно- и фазочастотная характеристики в асимптотическом приближении

# voltbricks

Производство высоконадежных DC/DC преобразователей

Унифицированные  
DC/DC преобразователи

## VDMC

Серия DC/DC преобразователей в форм-факторе BRICK для pin-to-pin замены популярных зарубежных изделий.

Линейка VDMC разработана для применения в жестких условиях эксплуатации, где требуется повышенная надежность, защищенность и соответствие высоким стандартам электропитания.

- Рабочая температура корпуса –55...+105 °С
- Низкопрофильная конструкция
- Дистанционное вкл/выкл
- Типовой КПД до 92%
- Форм-фактор Brick (DOSA pins)
- Защиты от перегрузки по току, КЗ и перенапряжения



Реклама

Модели	Мощность, Вт	Ном. входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Типовой КПД, %	Форм-фактор
VDMC25	25	28 (9...40) / (8...50)	3,3; 5; 9; 12; 15 24; 28; 48	88	1/32 Brick
VDMC50	50	28 (9...40) / (8...50)	3,3; 5; 9; 12; 15 24; 28; 48	90	1/16 Brick
VDMC120	120	28 (16...40) / (10...50)	3,3; 5; 12; 15 24; 28; 48	91	1/8 Brick
VDMC200	200	28 (16...40) / (10...50)	3,3; 5; 9; 12; 15 24; 28; 48	92	1/4 Brick
VDMC400	400		в разработке		
VDMC700	700		в разработке		

Отдел продаж  
+7 473 211-22-80  
sales@voltbricks.ru

Техническая поддержка  
+7 473 211-22-80  
support@voltbricks.ru



Реклама

voltbricks.ru/product/dcdc

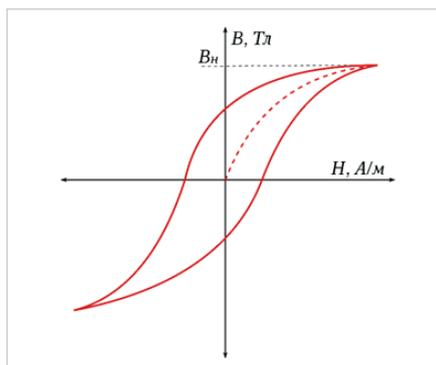


Рис. 2. Кривая намагничивания ферромагнетика

Таблица 1. Номиналы компонентов измерительной схемы

Компонент	Номинал
$C_{разв}$	680 мкФ
$L_{ист}$	860 мкГн
$R_t$	10,98 Ом

$$B = \frac{L \cdot I}{S}, \quad (4)$$

где  $B$  – индукция [Тл],  $L$  – индуктивность при протекании тока [Гн],  $I$  – ток [А],  $S$  – сечение магнитопровода [М<sup>2</sup>].

На графике амплитудно-частотной характеристики импеданса насыщение будет проявляться уменьшением импеданса в индуктивной области частот, так как закон его изменения в данной области подчиняется выражению (2). При этом значения сопротивления и ёмкости неизменны. Влияние насыщения на импеданс показано на рис. 3.

Пропуская постоянный ток с некоторым шагом через дроссель, возможно найти импеданс индуктивности в каждой точке тока и, используя (2), найти зависимость индуктивности от протекающего тока  $L(I)$ .

$$L = \frac{|Z(f)|}{2\pi \cdot f} \quad (5)$$

## Часть II: Эксперимент. Устройство измерителя импеданса

Для измерения импеданса удобно воспользоваться осциллографом с функцией построения диаграммы Боде или специализированным инструментом, в нашем случае это векторный анализатор цепей Vode 100. Покажем экспериментальную установку на рис. 4.

Генератор качающейся частоты  $U_{ген}(f, t)$  подключён через развязывающий трансформатор  $T_{разв}$  и развязывающий конденсатор  $C_{разв}$  к испытуемой индуктивности  $L$  последовательно с токоизмерительным резистором  $R_t$ . Трансформатор необходим для гальванической развязки генерато-

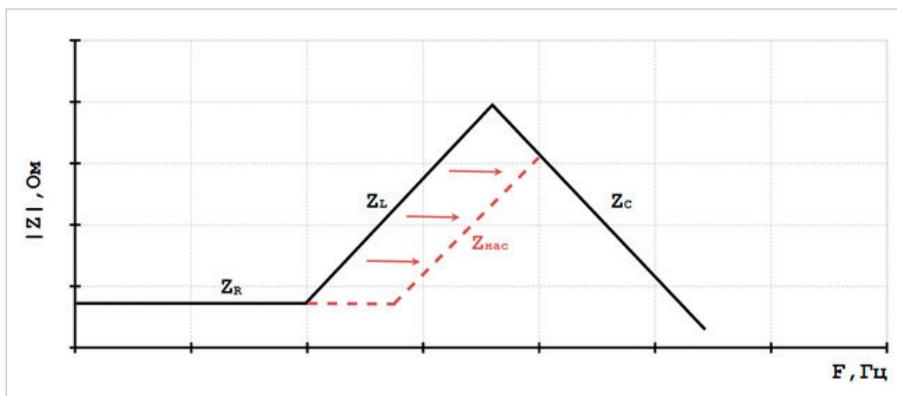


Рис. 3. Влияние насыщения на импеданс дросселя

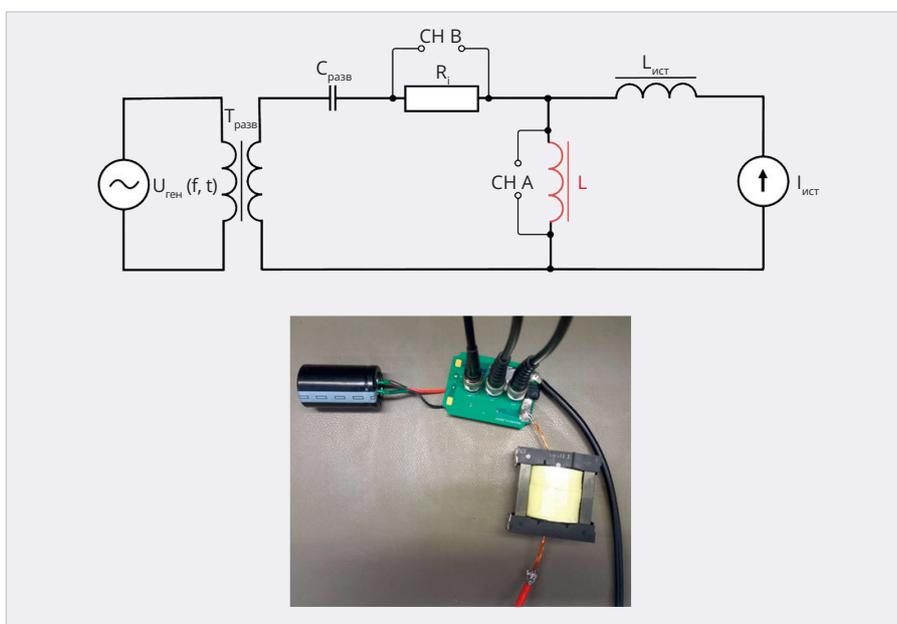


Рис. 4. Экспериментальная установка: схема и фото

ра, конденсатор – для исключения влияния источника тока  $I_{ист}$  на трансформатор. При выборе развязывающего конденсатора обращают внимание на его ёмкость: она должна быть такой, чтобы на минимальной частоте измерения его импеданс не превышал значений порядка сотен Ом и измеритель мог зафиксировать напряжение на дросселе и протекающий через него ток. В нашем случае это электролитический конденсатор 680 мкФ с импедансом на минимальной частоте измерения 10 Гц, равным 23 Ом.

Для анализа изменения индуктивности на дроссель подают постоянный ток от источника  $I_{ист}$  через индуктивность  $L_{ист}$ . Данная индуктивность должна быть много больше испытуемой для исключения влияния импеданса источника тока на эксперимент. В нашем случае  $L_{ист} = 860$  мкГн, что означает разницу в 180 раз:

$$L_{ист} \gg L. \quad (6)$$

Первый канал измерителя,  $CH A$ , подключается на контакты испытуемо-

го дросселя, второй,  $CH B$ , на контакты токоизмерительного резистора. Отметим, что в данной схеме ток детектируется противофазно, поэтому измеренное значение фазы будет отличаться от реального на  $\pi$  радиан. Для получения истинного значения импеданса измерения корректируются на величину токоизмерительного резистора

$$|Z| = |Z|_{изм} \cdot R_t \quad (7)$$

Сведём параметры измерительной установки в единую таблицу (табл. 1).

## Анализ параметров дросселя IHLP4040DZER4R7M11. Импеданс при отсутствии тока

Подключим дроссель, минимизируя длину всех дополнительных цепей, и выполним измерение импеданса при нулевом значении постоянной составляющей тока. Частотную характеристику импеданса покажем на рис. 5.

Проведём анализ амплитуды и фазы импеданса.

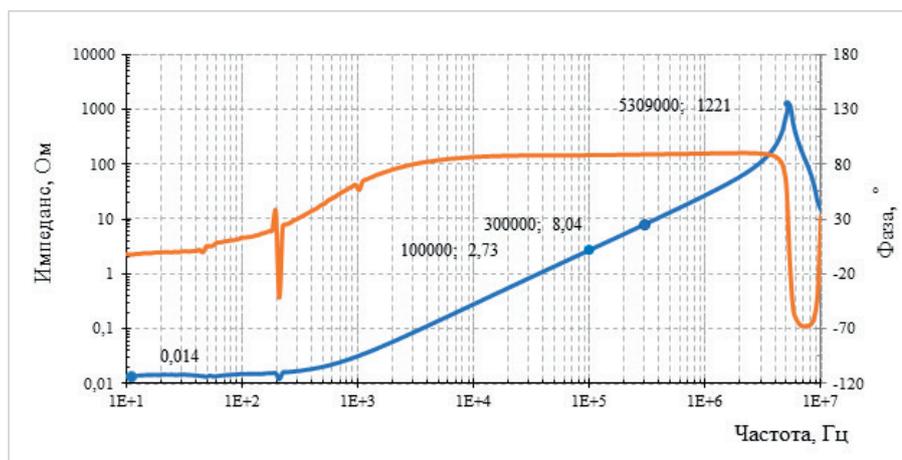


Рис. 5. Импеданс при нулевом значении постоянной составляющей тока

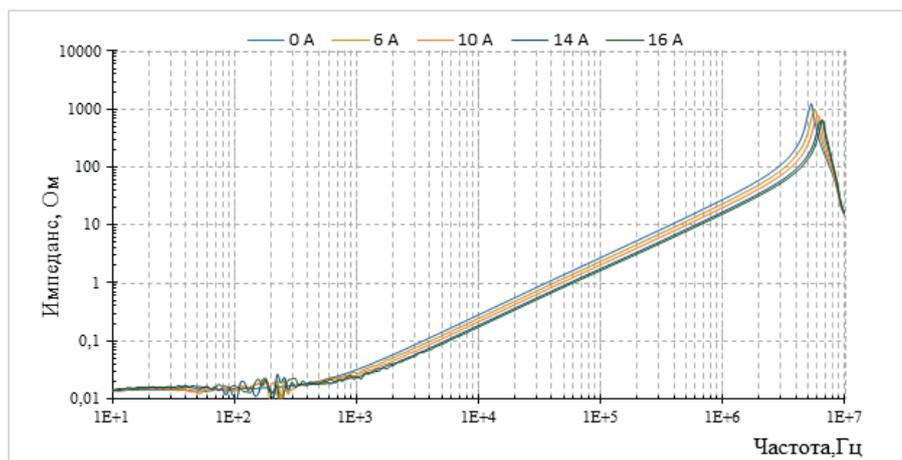


Рис. 6. Изменение импеданса с ростом тока

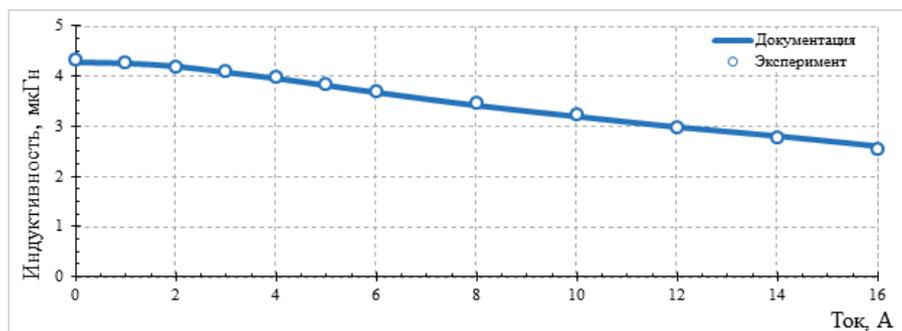


Рис. 7. Зависимость индуктивности дросселя IHLP4040DZER4R7M11 от тока

Таблица 2. Параметры дросселя IHLP4040DZER4R7M11

Параметр	Эксперимент	Документация
Активное сопротивление R, мОм	14	12,9–14,2
Индуктивность, мкГн	4,31	4,23–5,17
Ёмкость, пФ	209	–
Частотный диапазон	517 Гц – 5,309 МГц	max 1 МГц

На частотах  $f < 100$  Гц импеданс имеет резистивный характер, активное сопротивление  $R$  составляет:

$$R = 14 \text{ мОм.} \quad (8)$$

На частотах  $f \in [1 \text{ кГц} \dots 3 \text{ МГц}]$  дроссель проявляет ярко выраженный индуктив-

ный характер: увеличение импеданса в 10 раз на декаду и сдвиг фаз между током и напряжением  $90^\circ$ . Частоты 1 кГц и 3 МГц можно считать минимальной и максимальной частотой использования дросселя.

Расчёт индуктивности как наиболее важного параметра выполним в двух точках: 100 и 300 кГц, используя формулу (5).

$$L_1 = \frac{2,73 \text{ Ом}}{2 \cdot \pi \cdot 100 \text{ кГц}} = 4,345 \text{ мкГн},$$

$$L_2 = \frac{8,04 \text{ Ом}}{2 \cdot \pi \cdot 300 \text{ кГц}} = 4,265 \text{ мкГн}. \quad (9)$$

Среднее значение индуктивности равно:

$$L = \frac{L_1 + L_2}{2} = 4,31 \text{ мкГн}. \quad (10)$$

Частота перехода из резистивного в индуктивный характер составляет:

$$f = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L} = \frac{14 \text{ мОм}}{2 \cdot \pi \cdot 4,31 \text{ мкГн}} = 5,17 \text{ Гц}. \quad (11)$$

Так как частотных характеристик используемого измерителя импеданса недостаточно для качественной работы на частотах выше 10 МГц, вычислить ёмкость, используя (3), в нашем случае невозможно. Выполним оценку ёмкости по резонансной частоте импеданса, используя формулу Томпсона.

$$C = \frac{1}{4 \cdot L \cdot \pi^2 \cdot f^2} = \frac{1}{4 \cdot 4,31 \text{ мкГн} \cdot \pi^2 \cdot (5,309 \text{ МГц})^2} = 209 \text{ пФ}. \quad (12)$$

Сведём результаты анализа в табл. 2.

### Изменение импеданса при протекании тока в дросселе

В диапазоне токов  $I \in [0 \dots 16]$  А выполним измерение импеданса в дросселе и покажем, как изменяется его импеданс (рис. 6).

Вычислим индуктивность в каждой точке тока и построим кривую насыщения (рис. 7).

Максимальное относительное отклонение эксперимента от документации составило 3%, что можно объяснить разбросом параметров дросселя относительно данных документации, а также погрешностью измерений.

### Заключение

Частотный анализ импеданса – эффективный метод получения комплексной информации о компоненте. Подходит не только для дросселей, но и для резисторов и конденсаторов. Частотный метод становится единственным методом анализа малых индуктивностей, величины которых не превышают сотни наногенри, где стандартные RLC-измерители дают большую погрешность. Используя данный метод, возможно проконтролировать качество приобретённых дросселей, а также сформировать полную документацию на созданный своими силами компонент. ©