

## Определение потерь мощности в импульсных источниках электропитания

**В импульсных источниках электропитания есть множество компонентов, создающих потери мощности. Прежде всего, это силовые MOSFET-транзисторы, конденсаторы входных и выходных фильтров и моточные изделия: трансформаторы и дроссели (катушки индуктивности). В данной статье делается акцент на потери, создаваемые катушками индуктивности. Рассеяние мощности в них связано с потерями в магнитном сердечнике и активными потерями в обмотках.**

Травис АЙЧОРН

### Принцип действия катушки индуктивности

Силовые катушки индуктивности действуют как устройства накопления энергии. Они запасают энергию в магнитном поле во время включения и отдают накопившуюся энергию нагрузке во время выключения. Простейший дроссель состоит из медной обмотки, навитой на ферромагнитном сердечнике. Чтобы выяснить причину потери мощности в индуктивной катушке, необходимо понять физический смысл ее основных параметров. К ним относятся магнитодвижущая сила  $F(t)$ , напряженность магнитного поля  $H(t)$ , магнитный поток  $\Phi(t)$ , плотность магнитного поля  $B(t)$ , магнитная проницаемость  $\mu$  и магнитное сопротивление  $R$ .

Во избежание сложностей понимания физики электромагнитного поля, вкратце остановимся на магнитных составляющих. Напряженность магнитного поля обозначается  $H(t)$  и измеряется в  $A \times \text{вит}/m$  ( $A \times \text{turn}/m$ ). В силовых катушках индуктивности, работающих в режиме переключения, считается, что все магнитное поле сосредоточено в магнитном сердечнике. Это магнитное поле образуется, когда электрический ток проходит через витки провода, намотанного вокруг сердечника. Магнитный поток измеряется в веберах и представляет собой плотность магнитного поля, умноженную на площадь поперечного сечения сердечника или  $\Phi(t) = A_C \times B(t)$ . Плотность магнитного поля, измеряемая в теслах, равна напряженности магнитного поля, умноженной на магнитную проницаемость магнитного сердечника, или  $B(t) = \mu \times H(t)$ .

Магнитная проницаемость ( $\mu$ ), измеряемая в генри/м, характеризует собой способность материала пропускать через себя магнитный поток. Чем выше магнитная проницаемость материала, тем легче он пропускает магнит-

ный поток. Сама по себе  $\mu$  является произведением  $\mu_0$  и  $\mu_R$ , где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м), а  $\mu_R$  — относительная магнитная проницаемость материала (безразмерная величина). Примером может служить  $\mu_R$  железа, примерно равная 5000, другой крайностью является  $\mu_R$  воздуха, составляющая 1. Силовые катушки индуктивности содержат в себе сочетание феррита и воздуха, так что эффективная величина  $\mu$  находится между  $\mu$  феррита и  $\mu$  воздуха.

Магнитодвижущая сила  $F(t)$  в нашем случае примерно равна напряженности магнитного поля, умноженной на эффективную длину или  $H(t) \times l_E$ , и измеряется в  $A \times \text{вит}$ . ( $A \times \text{turn}$ ). Эффективная длина магнитопровода — это длина пути, который проходит магнитный поток вдоль сердечника. В магнитной цепи (изображенной на рис. 1b)  $F(t)$  можно представить в качестве генератора магнитного потока. И, наконец, магнитное сопротивление ( $R$ ), измеряемое в  $A \times \text{вит}/\text{Вб}$ , — это сопротивление материала магнитному полю. Это также соотношение магнитодвижущей силы  $F(t)$  и магнитного потока  $\Phi(t)$ , которое является функцией физической структуры сердечника, представленной в виде равенства:

$$R = \frac{l_E}{\mu \times A_C}$$

Катушки индуктивности работают согласно двум законам: Ампера (полного тока) и Фарадея (электромагнитной индукции). Закон Ампера определяет соотношение тока в обмотках (или витках провода) и магнитного поля в сердечнике катушки индуктивности. Магнитное поле в сердечнике катушки примерно одинаково по всей длине сердечника ( $l_M$ ). Это дает нам возможность выразить закон Ампера как  $H(t) \times l_E = n \times i(t)$ , где  $n$  — количество витков провода в обмотке катушки,  $i(t)$  — ток в катушке индуктивности. Закон Фарадея определяет отношение величины напряжения, прикладываемого к катушке индуктивности, к магнитному потоку в магнитном сердечнике. Это соотношение можно представить в виде равенства

$$V(t) = n \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

где  $\Phi(t)$  — магнитный поток, а  $n$  — количество витков провода в обмотке. На рис. 1a представлена принципиальная схема силовой катушки индуктивности, а на рис. 1b — магнитная цепь, эквивалентная силовым катушкам

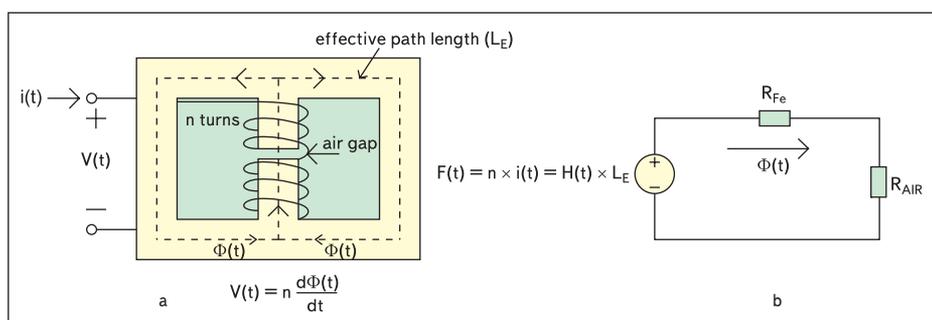


Рис. 1. Магнитная цепь

индуктивности. Воздушные зазоры обмотки увеличивают магнитное сопротивление ( $R_{AIR}$ ), создаваемое ферритовым материалом ( $R_{Fe}$ ), обладающим низким магнитным сопротивлением. В результате в воздушном зазоре возникает магнитодвижущая сила  $n \times i(t)$ .

Величина индуктивности рассчитывается по формуле:

$$L = \mu \times n^2 \times \frac{A_C}{l_E}$$

Поскольку феррит имеет высокую магнитную проницаемость (то есть низкое магнитное сопротивление), то магнитный поток легко проходит через него. Это помогает удерживать поток в пределах сердечника катушки и позволяет получить катушки небольшого размера с высокой индуктивностью. Сказанное видно из приведенного выше уравнения для индуктивности: использование материала с высоким значением  $\mu$  для изготовления сердечника позволяет получить меньшую площадь его поперечного сечения.

### Работа катушки индуктивности

Силовая катушка индуктивности работает следующим образом. В импульсном преобразователе напряжения в момент замыкания силового ключа на катушку индуктивности подается напряжение  $V_{IN}$ . Это приводит к увеличению тока в соответствии с выражением:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{V_{IN}}{L}$$

Меняющийся ток согласно закону Ампера

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{n}{l_M} \times \frac{di(t)}{dt}$$

вызывает изменение магнитного поля в материале сердечника. Это в свою очередь приводит к усилению магнитного потока через сердечник катушки индуктивности:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{n}{R} \times \frac{di(t)}{dt}$$

Данное равенство можно записать в переводе на плотность магнитного поля:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \frac{n}{A \times R} \times \frac{di(t)}{dt}$$

При выключении силового транзистора преобразователя напряжение  $V_{IN}$  снимается. Теперь магнитное поле начинает уменьшаться, что приводит к снижению

$$\frac{d\Phi}{dt}$$

в сердечнике катушки индуктивности.

Понижающееся  $\frac{d\Phi}{dt}$ ,

согласно закону Фарадея, вызывает появление напряжения в катушке индуктивности, равное

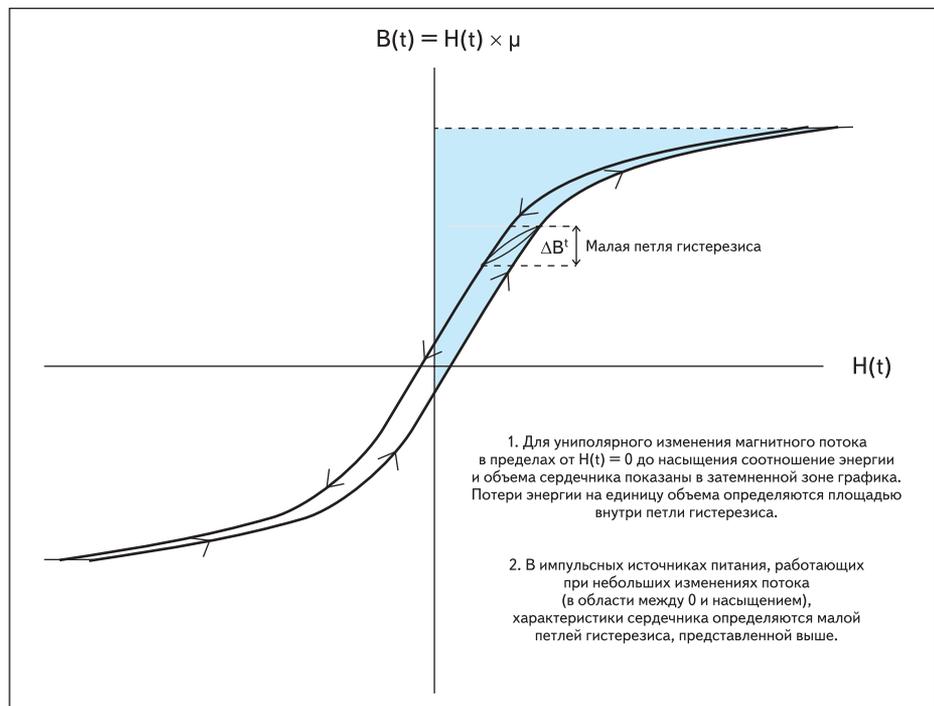


Рис. 2. Петля гистерезиса

$$-n \frac{d\Phi}{dt}$$

На рис. 2 жирной линией представлена кривая  $B(t)$  синусоидально меняющегося входного напряжения в качестве функции  $H(t)$  (так называемая петля гистерезиса). Отклик  $B(t)$  на  $H(t)$  не является линейным, изменение носит гистерезисный характер (отсюда и название «петля гистерезиса»). Гистерезис — это одна из характеристик материала сердечника, которая приводит к потерям энергии в сердечнике катушки индуктивности.

### Потери мощности в сердечнике катушки индуктивности

Потери мощности вследствие изменения магнитной энергии в сердечнике во время цикла переключения определяются разницей между магнитной энергией, подаваемой на сердечник во время включения, и магнитной энергией, снимаемой с сердечника во время выключения. Общее количество энергии ( $E_T$ ) в катушке индуктивности за один период переключения составляет

$$E_T = \int_0^T v(t) \times i(t) dt$$

Пользуясь законом Ампера

$$i(t) = H(t) \times \frac{l_M}{n}$$

и законом Фарадея

$$v(t) = n \times A \times \frac{dB(t)}{dt}$$

равенство для  $E_T$  можно переписать как

$$E_T = A \times l_M \int_{B_0}^B H \times dB$$

Отсюда общее количество энергии, подаваемой на сердечник, представляет собой площадь затененной зоны петли  $B-H$  на рис. 2, умноженную на объем сердечника. По мере того как ток катушки индуктивности падает, магнитное поле уменьшается и плотность магнитного потока находит другой путь (рис. 2 по направлению стрелок). Большая часть энергии передается нагрузке; разница между накопленной и отдаваемой энергией определяет уровень потерь. Потери в сердечнике представлены зоной, выделенной петлей  $B-H$ , умноженной на объем сердечника. Потери мощности определяются произведением энергии  $E_T$  на частоту переключения  $F_{sw}$ . Петля гистерезиса варьируется как функция  $\Delta B^n$ , где  $n$  для большинства ферритов находится в диапазоне 2,5–3. Сказанное справедливо для ненасыщенного состояния сердечника при частоте переключения, находящейся в области допустимых для ферромагнитного материала значений. Затененная зона на рис. 2 представляет 1-ю четверть петли  $B-H$  как рабочий диапазон отклонений плотности магнитного потока, поскольку большинство импульсных преобразователей напряжения обычно работают при положительных значениях тока в катушке индуктивности.

Второй тип потерь в сердечнике катушки индуктивности возникает из-за вихревых токов. Вихревыми токами называются токи в материале сердечника, вызванные изменениями магнитного потока

$$\frac{d\Phi}{dt}$$

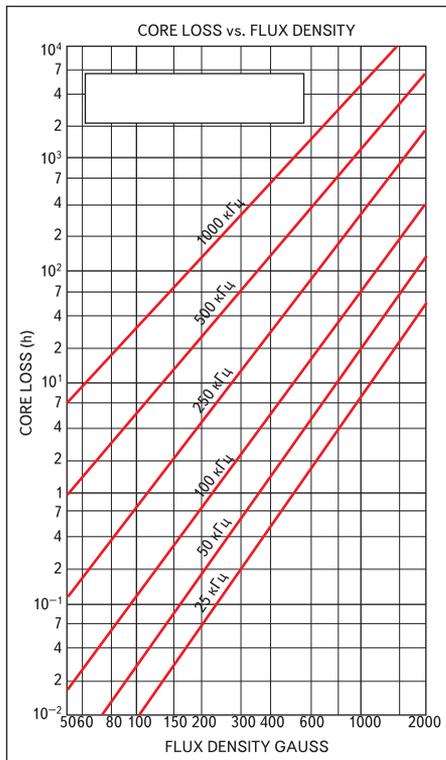


Рис. 3а. Данные по потерям в магнитном сердечнике от производителей феррита

Согласно правилу Ленца, меняющийся магнитный поток создает ток, который в свою очередь приводит к возникновению магнитного потока, оказывающего сопротивление первоначальному магнитному потоку. Вихревой ток протекает по проводящему материалу сердечника и в результате создает потери мощности  $P \times R$  (или  $V^2/R$ ). Если представить сердечник как концентрированный резистивный элемент с сопротивлением  $R_C$  то падение напряжения на нем, согласно закону Фарадея, выражается как

$$\frac{d\Phi}{dt} = A_C \times \frac{dB}{dt} = v_l(t),$$

где  $A_C$  — площадь поперечного сечения сердечника. Потери мощности в этом случае составляют

$$P_E = \frac{v_l(t)^2}{R_C}.$$

Потери мощности вследствие вихревых токов пропорциональны квадрату скорости изменения магнитного потока в сердечнике. Поскольку скорость изменения потока прямо пропорциональна приложенному напряжению, то потери мощности вследствие вихревых токов возрастают пропорционально квадрату напряжения, приложенного к катушке индуктивности и пропорционально ширине его импульса. Следовательно,

$$P_E \propto \frac{V_L^2}{R_C} \times \frac{t_{APPLIED}}{T_P},$$

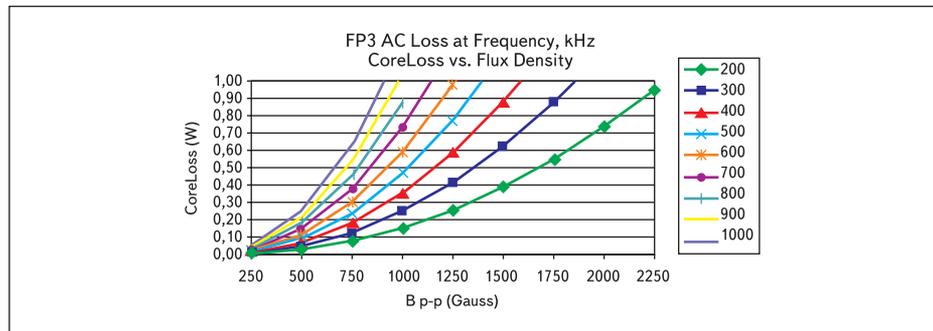


Рис. 3б. Данные по потерям в сердечнике от производителей катушек индуктивности

где  $V_L$  — приложенное к катушке индуктивности напряжение,  $t_{APPLIED}$  — время включения и выключения, и  $T_P$  — период переключения. Вихревые токи сердечника обычно принимаются во внимание гораздо в меньшей степени, чем гистерезисные потери вследствие высокого сопротивления материала сердечника. Обычно данные о потерях в сердечнике включают как гистерезисные потери, так и потери, создаваемые вихревыми токами.

Измерение потерь в сердечнике затруднительно, проблему представляет как измерение плотности магнитного потока, так и оценка зон петель гистерезиса. К сожалению, многие производители индуктивных катушек не дают таких данных. Однако, как правило, приводятся графики функций, которые можно использовать для примерного определения потерь в сердечнике. Их можно найти у производителей ферритов, они представлены как потери мощности в  $W/kg$  или  $W/cm^3$ , в функции плотности потока  $B(t)$  и частоты  $f_{SW}$ . Компания Spang и ее отделение по магнитным материалам (Magnetic division) поставляет ферритовые материалы изготовителям катушек индуктивности (см. [www.mag-inc.com](http://www.mag-inc.com)). На этом сайте можно найти таблицы свойств материалов, а также графики, отражающие зависимость потерь в сердечнике от плотности магнитного потока при различных частотах. Если известен тип ферритового материала и объем сердечника катушки индуктивности, то с помощью данных кривых можно достаточно точно определить потери в сердечнике.

Кривые, подобные представленным на рис. 3а для данного ферритового материала, приводятся для синусоидально меняющегося приложенного напряжения и двуполярного изменения магнитного потока. При определении потерь в сердечнике для импульсных преобразователей постоянного напряжения с учетом гармоник высоких частот и униполярными колебаниями магнитного потока можно найти приближенное значение, используя основную частоту и 1/2 плотности потока от пика до пика

$$\left( \frac{\Delta B(t)}{2} \right).$$

Объем катушки индуктивности или ее вес можно измерить или примерно рассчитать.

Некоторые производители катушек индуктивности предлагают диаграммы кривых потерь в сердечнике или уравнения, которые дают возможность сделать более точные расчеты потерь мощности в сердечнике. Например, Pulse в некоторых своих данных для катушек индуктивности приводит таблицы и уравнения для расчета потерь в сердечнике (см. [www.pulseeng.com](http://www.pulseeng.com), например, для катушек индуктивности SMT P1172/P1173). Потери в сердечнике даются в виде уравнения с использованием постоянных величин (факторы  $K$ ), позволяющих рассчитать потери в сердечнике как функцию частоты и амплитуды пульсации тока катушки индуктивности. С другой стороны, фирма Coiltronics приводит потери в сердечнике для многих своих катушек индуктивности в графической форме (см. [www.coiltronics.com](http://www.coiltronics.com), например, 3-серийные силовые катушки индуктивности Flat-Pac). На рис. 3б представлены графики потерь мощности в сердечнике в зависимости от плотности магнитного потока и частоты по данным фирмы Coiltronics.

### Потери мощности в обмотках катушек индуктивности

Потери мощности в обмотке возникают вследствие наличия активного сопротивления провода. Они определяются величиной сопротивления  $R_{DC}$  и среднеквадратичным значением тока обмотки  $I_{RMS}$  в соответствии с выражением  $I_{RMS}^2 \times R_{DC}$ . Сопротивление  $R$  определяется как

$$R = \rho \times \frac{Length}{Area}.$$

$\rho$  — удельное сопротивление материала обмотки (для меди  $\rho = 1,724 \times 10^{-8} (1 + 0,0042 \times (T^\circ C - 20^\circ C))$  Ом). В малогабаритных катушках индуктивности используется провод меньшего сечения, имеющий, соответственно, более высокое активное значение сопротивления. Увеличение количества витков также приводит к росту сопротивления обмотки.

Данные по потерям в обмотке обычно даются в справочных таблицах к катушкам индуктивности. По мере возрастания частоты возникает явление, известное под названием поверхностный эффект (или скин-эффект),

который вызывает увеличение сопротивления обмотки. Поверхностный эффект возникает в том случае, когда ток в проводнике изменяется с высокой частотой. Меняющийся ток приводит к изменению магнитного потока, при этом

$$\frac{d\Phi}{dt}$$

направлено перпендикулярно току. Согласно правилу Ленца, меняющийся магнитный поток вызывает появление вихревых токов, которые сами вызывают магнитный поток, противодействующий первоначальному меняющемуся магнитному потоку. Индуцированный магнитный поток имеет наибольшую напряженность в центре проводника и низкую — на поверхности проводника. Это приводит к тому, что ток в проводнике с возрастанием частоты смещается на его поверхность. Поскольку удельное сопротивление меди остается неизменным, а эффективная зона переноса тока проводника уменьшается, в результате сопротивление возрастает.

Сопротивление переменному току обмотки определяется глубиной воздействия поверхностного эффекта, или глубиной проникновения. Она определяется точкой, в которой плотность тока снижается до величины, равной 1/e плотности тока на поверхности (или при постоянном токе). Глубину проникновения ( $D_{PEN}$ ) можно вычислить, пользуясь следующим выражением:

$$D_{PEN} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times \mu \times f}}$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника (для меди  $\rho = 1,724 \times 10^{-8} (1 + 0,0042 \times (T - 20))$  мОм) и  $\mu$  — проницаемость проводника ( $\mu = \mu_0 \times \mu_r$ ;  $\mu_r = 1$  для меди). Поверхностный слой является однородным, если проводник имеет плоскую поверхность или радиус проводника гораздо больше, чем глубина проникновения. Сопротивление переменному току ( $R_{AC}$ ) создает потери мощности при наличии переменного или пульсирующего тока в обмотке. В импульсных преобразователях напряжения ток в катушке индуктивности имеет постоянную и переменную (пульсирующую) составляющую. Постоянный ток катушки индуктивности вызывает потери мощности только за счет активного сопротивления  $R_{DC}$ .

$R_{AC}$  определяется путем расчета зоны эффективной проводимости медного провода при данной частоте. Для проводников, у которых радиус больше, чем глубина поверхностного слоя при данной рабочей частоте, зона эффективной проводимости и есть поверхностная зона проводящего кольца. Толщина ее равна глубине поверхностного слоя. Поскольку удельная проводимость остается постоянной, соотношение  $R_{AC}$  и  $R_{DC}$  определяется соотношением двух зон:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{\pi \times r^2}{\pi \times r^2 - \pi (r - D_{PEN})^2} \cdot \frac{R_{AC}}{R_{DC}}$$

Данное соотношение, умноженное на  $R_{DC}$ , составляет действующее (эффективное) сопротивление при данной частоте для прямого провода в вакууме.

Вихревые токи в обмотках катушек индуктивности индуцируются также и другими близлежащими проводниками. Это явление известно под названием эффекта близости. В катушках индуктивности с множеством перекрывающихся друг друга витков провода и прилегающих проводов увеличенные вихревые токи вызывают значительно большее увеличение сопротивления, чем от поверхностного эффекта. Оценка данных эффектов еще более усложняется по причине различных конфигураций и расстояний проводников относительно друг друга. Поскольку рамки статьи не позволяют осветить все указанные проблемы, читатель может обратиться к представленной в конце статьи литературе, в которой этот вопрос освещен более полно.

### Оценка потери мощности

Для иллюстрации потерь в катушке индуктивности (рис. 4) можно составить простую схему. Сопротивление  $R_C$  определяет потери в сердечнике, а  $R_{AC}$  и  $R_{DC}$  отражает потери в обмотке, зависящие от переменного и постоянного тока.  $R_C$  определяется расчетным способом,  $R_{DC}$  и  $R_{AC}$  представляют собой сопротивление обмотки постоянному току и переменному току вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. Пример модели данных потерь дается с помощью импульсного источника питания MAX5073. Мы используем MAX5073 в качестве импульсного понижающего преобразователя при  $V_{IN} = 12$  А,  $V_{OUT} = 5$  А и  $I_{OUT} = 2$  А. В преобразователе применен дроссель 4,7 мкГн (FP3-4R7 от фирмы Coiltronics), при этом уровень пульсаций тока  $\Delta I(t)$  достигает 621 мкА. На рис. 3б представлена кривая потерь в сердечнике относительно плотности магнитного потока и частоты. В данном случае внутри большой петли гистерезиса намечается малая петля (см. внутреннюю петлю на рис. 2).  $\Delta B$  можно определить, пользуясь уравнением из табличных справочных данных к катушке индуктивности, где  $\Delta B = K \times L \times \Delta i(t) \times I_{DC}$ .  $K$  — это постоянная величина, приведенная в таблице (в нашем случае  $K = 105$ ), а  $L$  — индуктивность в мкГн. В результате это дает  $\Delta B(t) = 105 \times 4,7 \times 0,621 \times 2 = 613$  Гс. Как вариант,  $B(t)$  можно определить, используя произведение напряжения катушки на скорость нарастания тока в обмотке, деленное на число витков и на площадь сечения обмотки:

$$\left( \Delta B(t) = \frac{V_L \times t_{ON}}{A} \right)$$

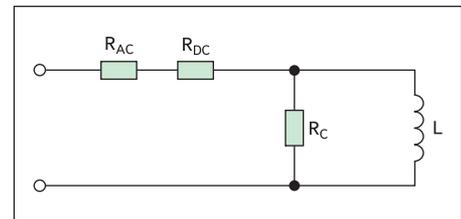


Рис. 4. Модель эквивалентных потерь мощности в катушке индуктивности

Исходя из рис. 3б, потери в сердечнике при 613 Гс составляют примерно 470 мВт. На рис. 4  $R_C$  представляет собой эквивалент шунтирующего сопротивления, которое вызывает потери мощности в сердечнике катушки индуктивности. Это сопротивление рассчитывается исходя из среднеквадратического значения напряжения в катушке индуктивности и потери мощности в сердечнике.

$V_{RMS} = V_{IN} \times \sqrt{D} = 12V \times \sqrt{0,417} = 7,75V_{RMS}$ , тогда

$$R_C = \frac{60,1V^2}{0,470W} = 128 \text{ Ом.}$$

$V_{IN} \times \sqrt{D}$  — среднеквадратическое значение прямоугольного напряжения с коэффициентом заполнения  $D$  и амплитудой  $V_{IN}$ .

В таблице для  $R_{DC}$  дается величина 40 мОм, считается, что температура катушки не повышается. Глубина проникновения при частоте переключения 1 МГц, при треугольной форме тока пульсаций и  $T_A = +20$  °С составляет 0,065 мм. При грубом измерении радиус проводника равен 0,165 мм. Это дает  $R_{AC}$  от

$$R_{DC} \times \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 40 \text{ мОм} \times \frac{\pi \times 0,165^2}{\pi \times 0,165^2 - \pi (0,165 - 0,065)^2} = 63 \text{ мОм.}$$

Среднеквадратичное значение пульсации тока в катушке индуктивности:

$$I_{RMS} = \frac{\Delta I}{\sqrt{12}} = \frac{0,621}{3,46} = 0,179 \text{ А.}$$

При этом общие предполагаемые потери:

$$P_{RDC} + P_{RAC} + P_{CORE} = I_{DC}^2 \times R_{DC} + I_{ACRMS}^2 \times R_{AC} + 470 \text{ мВт} = 632 \text{ мВт.}$$

### Литература

1. Эрикссон Р. В. и Максимовик Д. Основы силовой электроники.
2. Кассакиан Д. Г., Шлехт М. Ф., Вергес Д. С. Принципы силовой электроники.
3. Диксон Л. Х. Магнитная конструкция импульсных источников электропитания.