

Определение потерь мощности в импульсных источниках электропитания

Травис АЙЧОРН

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.

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 μ 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 А×вит./м (А×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 (μ), 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 μ является произведением μ_0 и μ_R , где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м), а μ_R — относительная магнитная проницаемость материала (безразмерная величина). Примером может служить μ_R железа, примерно равная 5000, другой крайностью является μ_R воздуха, составляющая 1. Силовые катушки индуктивности содержат в себе сочетание феррита и воздуха, так что эффективная величина μ находится между μ феррита и μ 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 А×вит. (А×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 А×вит./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

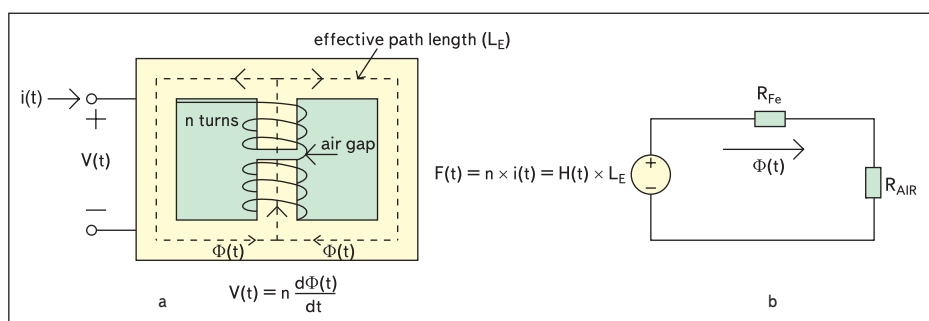


Рис. 1. Магнитная цепь

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 μ 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

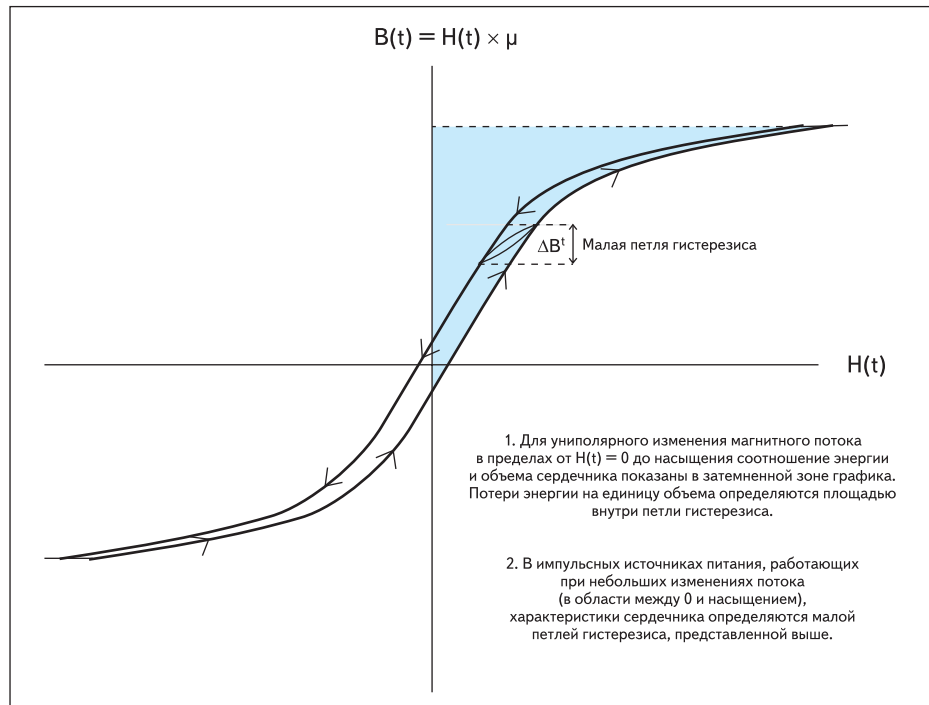


Рис. 2. Петля гистерезиса

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

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 затемненной 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 ΔB^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. Затемненная 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

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

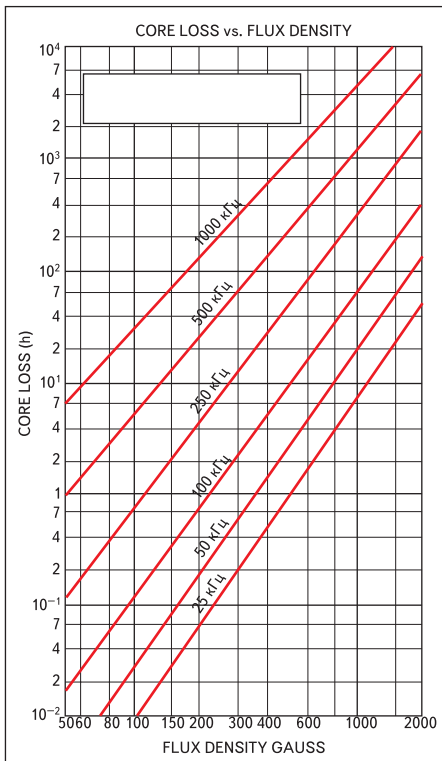


Рис. 3а. Данные по потерям в магнитном сердечнике от производителей феррита

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

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

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

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

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,

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

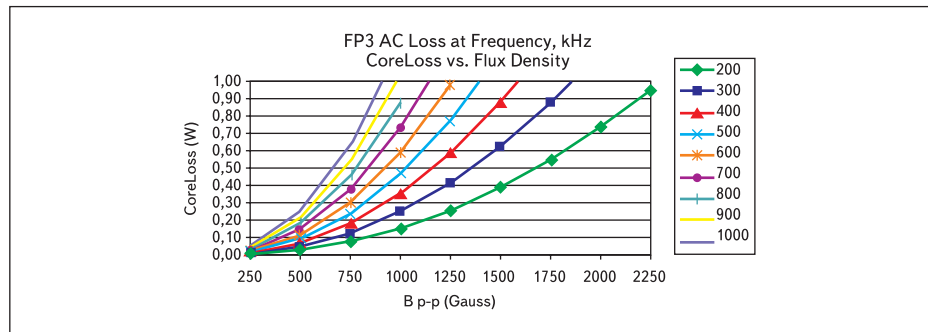


Рис. 3б. Данные по потерям в сердечнике от производителей катушек индуктивности

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). 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, 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, 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

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

ρ — удельное сопротивление материала обмотки (для меди $\rho = 1,724 \times 10^{-8} (1 + 0,0042 \times (T^\circ C - 20^\circ C))$ мОм). 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 ρ — удельное сопротивление проводника (для меди $\rho = 1,724 \times 10^{-8} (1 + 0,0042 \times (T^\circ C - 20^\circ C))$ мОм) и μ — 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). ΔB 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:

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

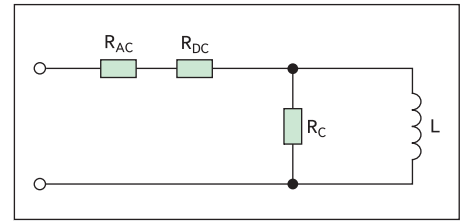


Рис. 4. Модель эквивалентных потерь мощности в катушке индуктивности

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 $T_A = +20^\circ C$ 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:

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

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.