

## Оптимизация сопротивления переменному току многослойных обмоток трансформатора с произвольной формой тока

W.G. Hurley, Senior Member, IEEE, E. Gath, and J.G. Breslin, Member, IEEE  
Power Electronics Research Centre, National University of Ireland, Galway, Ireland  
University of Limerick, Ireland

**Аннотация** - AC потери из-за несинусоидального тока были найдены путем вычисления потерь на частотах гармоник для которых известны коэффициенты Фурье. Оптимальная толщина фольги или толщины слоя в обмотке могут быть найдены путем применения анализа Фурье в диапазоне толщин. Эта статья представляет новую формулу для определения оптимальной толщины фольги или толщины слоя, без необходимости использования коэффициентов Фурье и расчетов на частотах гармоник. Новая формула требует знания среднеквадратичного значения тока и среднеквадратичного значения производной от тока. Она проста и может быть применена в отношении любой периодической формы тока.

### Обозначения

$d$  - Толщина фольги или слоя.

$D$  - Рабочий цикл ШИМ.

$f$  - Основная частота тока в Гц.

$I_{dc}$  - Среднее значение тока.

$I_n$  - среднеквадратичное значение  $n$ -ой гармоники.

$I_{rms}$  - среднеквадратичное значение тока.

$I_{rms}'$  - среднеквадратичное значение производной от тока.

$k_{pn}$  - Отношение ac-сопротивления к dc-сопротивлению для  $n$ -ой гармоники.

$N$  - Количество витков в слое.

$n$  - Номер гармоники.

$p$  - Количество слоев.

$r_0$  - Радиус оголенный провод в проволочной обмотке.

$R_{ac}$  - ac-сопротивление обмотки с синусоидальным возбуждением.

$R_{dc}$  - dc-сопротивление обмотки.

$R_{eff}$  - Эффективное ac-сопротивление обмотки, с произвольной формой тока.

$R_\delta$  - dc-сопротивление обмотки толщиной  $\delta_0$ .

$t_r$  - Время нарастания (0-100%).

$T$  - Период тока.

$\delta_0 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}$  Глубина скин-слоя на основной частоте,  $\omega = 2\pi f$ .

$\delta_n$  - Глубина скин-слоя на частоте  $n$ -ой гармоники.

$\eta$  - Пористость фактор, см. рис. 1.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторы работают на высоких частотах с целью уменьшения их размера [1]. Импульсные и резонансные схемв значительно улучшили эффективность источников питания. Эти источники питания имеют не синусоидальную форму тока, что приводит к дополнительным потерям переменного тока из-за гармоник. Эффекты ac-сопротивления, связанные с синусоидальными токами рассматривались Беннетт и Ларсон [2] и эта работа Доуэля [3] была специально ориентирована для трансформаторов. Эти работы основаны на одномерные решения уравнения рассеивания применительно к проводящим параллельным пластинам. С помощью формулы Доуэля было установлено повышенное сопротивление цилиндрической обмотки, где толщина фольги или слоя составляет менее 10% от радиуса кривизны. Формула была использована во многих приложениях, таких как планарные магнитные элементы Kassakian [4] и Салливан [5], матричные трансформаторы Вильямса [6], тороидальные индуктивности на Ченга [7], распределенные воздушные зазоры Эванса [8] и связанные проводники Хансельмана [9]. С появлением импульсных источников питания, внимание переключается на несинусоидальные токи. Эти токи были разложены на составляющие Фурье; гармонические составляющие ортогональны, так что полные потери, равные сумме потерь, рассчитываются по формуле Доуэля для амплитуды и частоты каждой гармоники в свою очередь. Венкатраман [10] показал, что для импульсного сигнала, типичного для прямоходового преобразователя, есть оптимальная толщина слоя, которая минимизирует потери переменного тока. Карстен [11] расширил анализ прямоугольных сигналов, которые встречаются в полномостовом преобразователе и треугольной формы тока, характерной для дросселей фильтра. Vandelac [12] распространил анализ на обратногоходовые преобразователи. Оптимальная толщина слоя найдена, как следует:

- Расчет коэффициентов Фурье
- Расчет потерь для каждой гармоники
- Расчет общих потерь для каждой толщины в диапазоне значений
- Определение оптимальной толщиной из графика сопротивления переменного тока в зависимости от толщины слоя

Обычно это может быть связано с расчётом потерь для 30 гармоник 10 значений толщин, для того, чтобы найти оптимальное значение. Кроме того коэффициенты Фурье доступны только для нескольких форм сигналов.

Эта статья представляет новую формулу определения ас-сопротивления и оптимальной толщины слоя для любой формы периодического тока. Формула требует только знания среднеквадратичного значение кривой тока и среднеквадратичное значение производной от этой кривой тока. Обе эти величины могут быть легко измерены или рассчитаны при помощи моделирующих программ, таких как PSPICE. Результаты столь же точны, как в случае использования громоздкого метода, основанного на анализе Фурье.

## II. АС-сопротивление

Действительная часть формулы Доуэля дает отношение ас-сопротивления к dc-сопротивлению:

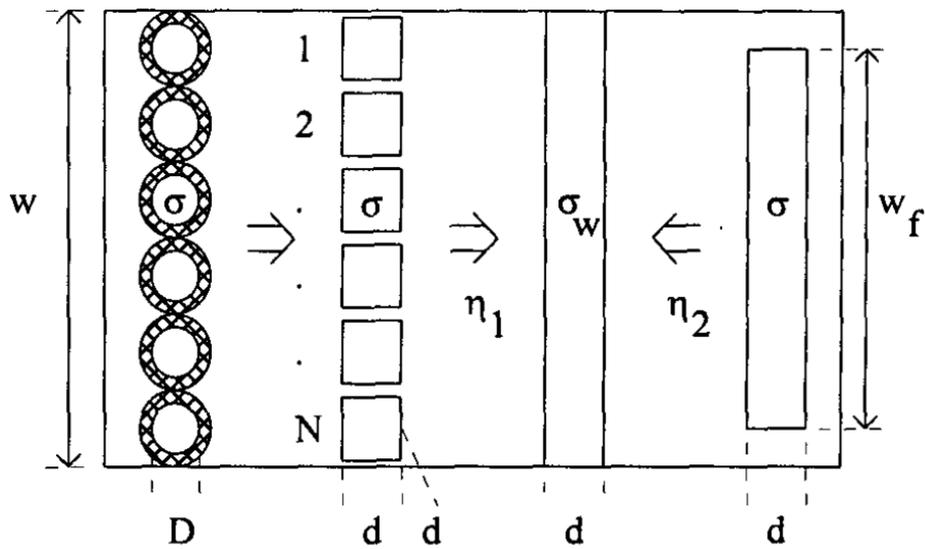
$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \Delta \left[ \frac{\sinh(2\Delta) + \sin(2\Delta)}{\cosh(2\Delta) - \cos(2\Delta)} + \frac{2(p^2 - 1)}{3} \frac{\sinh(\Delta) - \sin(\Delta)}{\cosh(\Delta) + \cos(\Delta)} \right] \quad (1)$$

где  $\Delta$  это отношение толщины слоя  $d$  к глубине скин-слоя  $\delta_0$ . Это очень хорошее приближение к оригинальному цилиндрическому решению, особенно если толщина слоя составляет менее 10% от радиуса кривизны. Обмотки, которые состоят из круглых проводников или фольги и не распространяются на полную высоту окна, можно рассматривать как фольгу с эквивалентной толщиной  $d$  и эффективной проводимостью  $\sigma_w = \eta\sigma$ . Этот расчет показан графически на рис. 1, подробное рассмотрение проводимости провода дается Феррейра [13] и Jongasma [14]. Ортогональность скин эффект и эффекта близости близости в обмотки описывается Феррейра [13].

Тригонометрические и гиперболические функции в (1) могут быть представлены в виде разложения в ряд:

$$\frac{\sinh 2\Delta + \sin 2\Delta}{\cosh 2\Delta - \cos 2\Delta} \approx \frac{1}{\Delta} + \frac{4}{45} \Delta^3 - \frac{16}{4725} \Delta^7 + O(\Delta^{11}) \quad (2)$$

$$\frac{\sinh \Delta + \sin \Delta}{\cosh \Delta - \cos \Delta} \approx \frac{1}{6} \Delta^3 - \frac{17}{2520} \Delta^7 + O(\Delta^{11}) \quad (3)$$



$$d = \sqrt{\frac{\pi}{4}} D \quad \eta_1 = \frac{Nd}{w} \quad \eta_2 = \frac{w_f}{w}$$

$$\sigma_w = \eta_i \sigma$$

Рис. 1. Коэффициент пористости для фольги и круглых проводников.

Если используются только члены до порядка  $\Delta^3$ , относительной погрешность полученная в (2) составляет менее 1,2% для  $\Delta < 1.2$  и относительная погрешность в (3) составляет менее 4,1% для  $\Delta < 1$  и меньше 8,4 %, если  $\Delta < 1.2$ . Асимптотические значения функции в левой части (2) и (3) есть 1 для  $\Delta > 2.5$ . Условия до порядка  $\Delta^3$  достаточно точны для учета гармоник Фурье, которые используются для прогнозирования оптимального значения  $\Delta$ , который обычно находится в диапазоне 0,3 - 1. Таким образом, (1) примет вид

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + \frac{\Psi}{3} \Delta^4 \quad (4)$$

где

$$\Psi = \frac{5p^2 - 1}{15} \quad (5)$$

Ток произвольной периодической формы, можно представить в виде ряда Фурье

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \cdot \omega t) + b_n \sin(n \cdot \omega t) \quad (6)$$

Синус и косинус могут быть объединены, чтобы дать альтернативную форму

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (7)$$

где  $I_{dc}$  является dc значением  $i(t)$  и  $c_n$  является амплитудой n-ой гармоники с соответствующей фазой  $\varphi_n$ .

Среднеквадратичное значение n-ой гармоники  $I_n = c_n / \sqrt{2}$ .

Общая потеря мощности из-за всех гармоник

$$P = R_{dc} I_{dc}^2 + R_{dc} \sum_{n=1}^{\infty} k_{pn} I_n^2 \quad (8)$$

где  $k_{pn}$ , является коэффициентом ac сопротивления для n-ой частотной гармоники, которое можно найти из (1)

$$k_{pn} = \sqrt{n} \Delta \left[ \frac{\text{Sinh}(2\sqrt{n}\Delta) + \text{Sin}(2\sqrt{n}\Delta)}{\text{Cosh}(2\sqrt{n}\Delta) - \text{Cos}(2\sqrt{n}\Delta)} + \frac{2(p^2 - 1)}{3} \frac{\text{Sinh}(\sqrt{n}\Delta) - \text{Sin}(\sqrt{n}\Delta)}{\text{Cosh}(\sqrt{n}\Delta) + \text{Cos}(\sqrt{n}\Delta)} \right] \quad (9)$$

$R_{eff}$  является ac сопротивлением ожидаемым  $i(t)$ , так что  $P = R_{eff} I_{rms}^2$ , где  $I_{rms}$  является действующим значением  $i(t)$ . Таким образом, отношение эффективного ac сопротивления к dc сопротивлению

$$\frac{R_{eff}}{R_{dc}} = \frac{I_{dc}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} k_{pn} I_n^2}{I_{rms}^2} \quad (10)$$

Скин-слой для n-ой гармоники есть  $\delta_n = \delta_0 / \sqrt{n}$  и, из (4), коэффициент ac сопротивления для n-ой частотной гармоники

$$k_{pn} = 1 + \frac{\Psi}{3} n^2 \Delta^4 \quad (11)$$

Подставка (11) в (10) дает

$$\frac{R_{eff}}{R_{dc}} = \frac{I_{dc}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 + \frac{\Psi}{3} \Delta^4 \sum_{n=1}^{\infty} n^2 I_n^2}{I_{rms}^2} \quad (12)$$

Среднеквадратичное значение тока в условиях этих гармоник есть

$$I_{rms}^2 = I_{dc}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \quad (13)$$

Производная от  $i(t)$  в (7) есть

$$\frac{di}{dt} = -\omega \sum_{n=1}^{\infty} n c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (14)$$

и среднеквадратичное значение производной тока [15]

$$I_{rms}^2 = \omega^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 c_n^2}{2} = \omega^2 \sum_{n=1}^{\infty} n^2 I_n^2 \quad (15)$$

которое после подстановки в (12), используя (13), дает

$$\frac{R_{eff}}{R_{dc}} = 1 + \frac{\Psi}{3} \Delta^4 \left[ \frac{I_{rms}}{\omega I_{rms}} \right] \quad (16)$$

Это просто выражение для эффективного сопротивления обмотки с произвольной формой кривой тока, которое может быть оценено без знания коэффициентов Фурье для сигнала.

### III. Оптимальные условия

Существует оптимальное значение  $d$ , которое дает минимальное значение эффективного сопротивления для переменного тока. Определим  $R_\delta$  как сопротивление фольги толщиной  $\delta$ , так что

$$\frac{R_\delta}{R_{dc}} = \frac{d}{\delta_0} = \Delta \quad (17)$$

откуда следует, что

$$\frac{R_{eff}}{R_\delta} = \Delta \frac{R_{eff}}{R_\delta} \quad (18)$$

Видно, что график  $R_{eff}/R_\delta$  в зависимости от  $\Delta$  имеет ту же форму как график  $R_{eff}$  в зависимости от  $d$  на данной частоте. 3-х мерный график  $R_{eff}/R_\delta$  в зависимости от  $\Delta$  с  $p$  (число слоев в обмотке) на третьей оси показан на рис. 2.

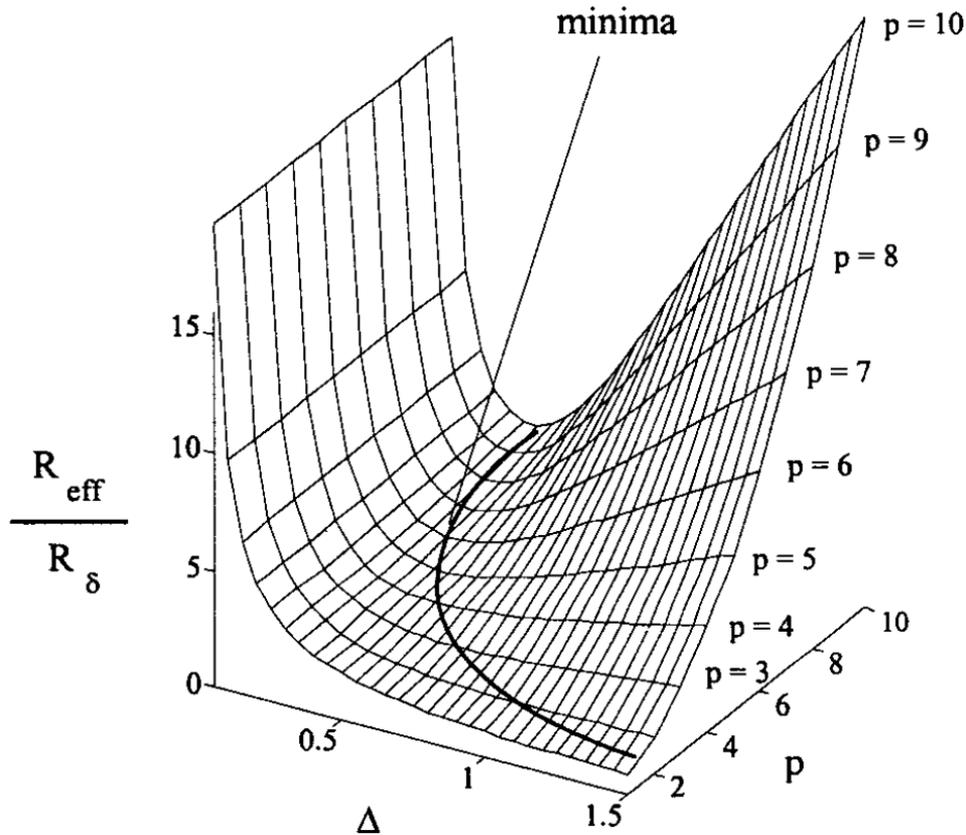


Рис. 2. График ас сопротивления в зависимости от  $\Delta$  и числа слоёв обмотки  $p$ .

Для каждого значения  $p$  имеется оптимальное значение  $\Delta$ , где ас сопротивление обмотки минимально. Эти оптимальные точки лежат на линии, отмеченной **minima** на графике и соответствующего значения оптимальной толщины слоя

$$d_{opt} = \Delta_{opt} \delta_0 \quad (19)$$

Из (18), используя (16)

$$\frac{R_{eff}}{R_\delta} = \frac{1}{\Delta} + \frac{\Psi}{3} \Delta^3 \left[ \frac{I'_{rms}}{\omega I_{rms}} \right]^2 \quad (20)$$

Оптимальное значение  $\Delta$  находится путем взятия производной (20) и приравнивания её к нулю.

$$\frac{d}{d\Delta} \left( \frac{R_{eff}}{R_\delta} \right) = -\frac{1}{\Delta^2} + \Psi \Delta^2 \left[ \frac{I'_{rms}}{\omega I_{rms}} \right]^2 = 0 \quad (21)$$

Оптимальное значение  $\Delta_{opt}$

$$\Delta_{opt} = \frac{1}{\sqrt[4]{\Psi}} \sqrt{\frac{\omega I_{rms}}{I'_{rms}}} \quad (22)$$

Подстановка этого результата в (16) дает оптимальное значение эффективного сопротивления переменного тока с произвольной периодической формой:

$$\left( \frac{R_{\text{eff}}}{R_{\text{dc}}} \right)_{\text{opt}} = \frac{4}{3} \quad (23)$$

Jongsma [14] и Снеллинг [16] уже установили этот результат для синусоидального возбуждения. Соответствующее значение для проволочных проводников с синусоидальным возбуждением есть 3/2 [14,16].

Мы можем также написать (16) в терминах  $\Delta_{\text{opt}}$

$$\frac{R_{\text{eff}}}{R_{\text{dc}}} = 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta}{\Delta_{\text{opt}}} \right)^4 \quad (24)$$

Теперь у нас есть набор простых формул, с которыми можно найти оптимальное значение фольги или толщине слоя обмотки и ее эффективное сопротивление для переменного тока. Эти формулы основаны на средневладратичном значении огибающей тока и средневладратичном значении его производной.

#### IV. ПРОВЕРКА

Рассмотрим импульсный ток характерный для преобразователя, изображённый на рис.3, вместе с его производной. Этот сигнал разлагается в ряд Фурье:

$$i(t) = I_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{t_r}{T} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_0}{n^3 \pi^3 \left( \frac{t_r}{T} \right)^2} \times \left[ 1 - \cos \left( \frac{n\pi t_r}{T} \right) \right] \sin \left[ n\pi \left( \frac{1}{2} - \frac{t_r}{T} \right) \right] \cos \left[ n \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (25)$$

Средневладратичное значение  $I(t)$  и средневладратичное значение его производной

$$I_{\text{rms}} = I_0 \sqrt{0.5 - \frac{37t_r}{30T}} \quad (26)$$

$$I'_{\text{rms}} = I_0 \sqrt{\frac{8}{3t_r T}}$$

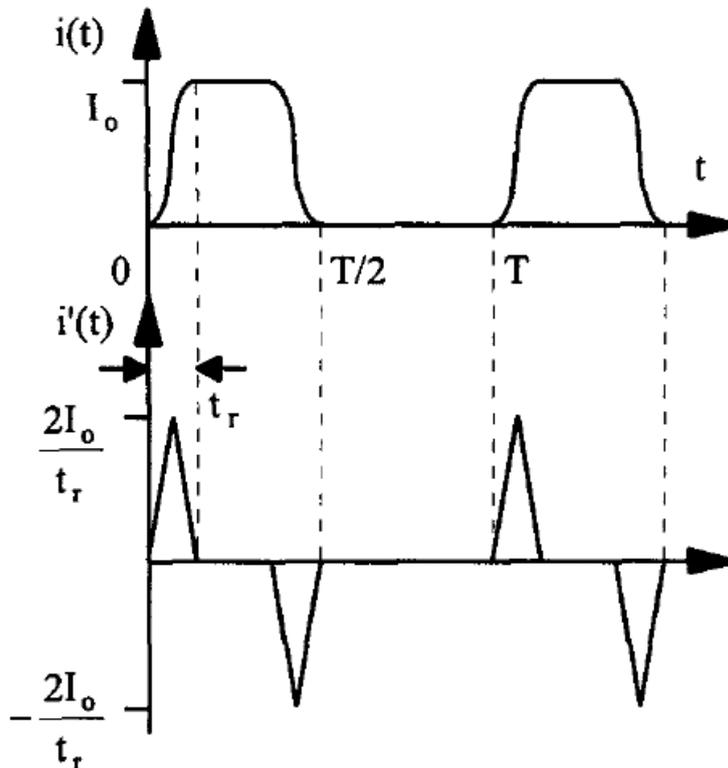


Рис.3. Импульсный ток и его производная.

Оптимальное значение данное рядом Фурье (25) для  $p = 6$  и  $t_r/T = 4\%$  есть 0.418 и значение данное предложенной формулой (22) есть 0.387, что составляет ошибку 7.4%.

Сигнал 5 в таблице II является приближением к импульсу на рис. 3 и оптимальное значение  $\Delta$  используя анализ Фурье является 0.425, что представляет ошибку на 7,2% по сравнению с анализом Фурье сигнала данного (25). Очевидно сигнал с известным разложением в ряд Фурье является приближением к

фактической форме волны и может привести к ошибкам, которые имеют тот же порядок, что и новая формула, которой проще пользоваться.

При 50 кГц скин-слой в меди составляет 0.295 мм. С  $\Delta_{opt} = 0.418$ ,  $d_{opt} = 0.295 \times 0.418 = 0.123$  мм.

Новая формула может быть проверена путем сравнением значения  $\Delta_{opt}$  полученным в (22) и значением, полученным при помощи анализа Фурье, строя (10), используя (9), в диапазоне значений  $\Delta$  и нахождения оптимального значения. Результаты приведены в таблице I для сигналов в таблице II. В целом соглашение находится в пределах 3%, за исключением сигнала 5, где ошибка составляет 6,5%. Для анализа Фурье 19 гармоник были оценены и были рассчитаны 20 значений  $\Delta$ . Это означает, что (9) была вычислена 380 раз для каждого сигнала в порядке нахождения оптимальной толщин слоя и (22) был вычислен один раз для получения того же результата. От 1 до 3-х слоев точность предложенной формуле не очень хороша, однако, о чем свидетельствует рис. 2, график  $R_{eff}/R_{\delta}$  является почти плоским в области оптимального значения  $\Delta$ , и поэтому ошибка для сопротивления переменному току можно пренебречь.

**Таблица I. Результаты проверки,  $\rho = 6$ ,  $D = 0.4$ ,  $t_r/T = 4\%$**

Кривая №	Анализ Фурье	Новая формула
1	0.539	0.538
2	0.490	0.481
3	0.348	0.340
4	0.429	0.415
5	0.416	0.389
6	0.328	0.314
7	0.515	0.507
8	0.460	0.458
9	0.333	0.324

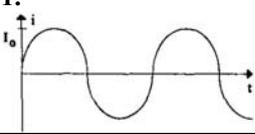
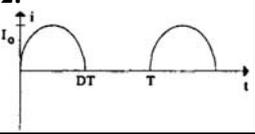
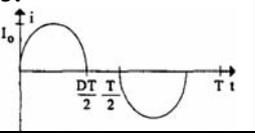
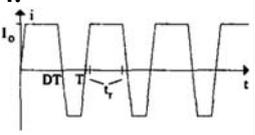
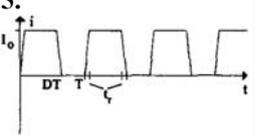
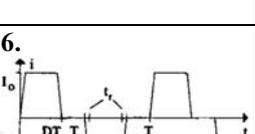
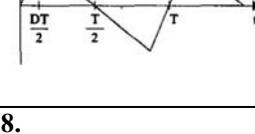
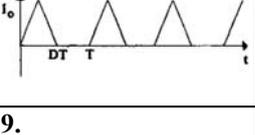
## **V. ВЫВОДЫ**

Новая формула была представлена чтобы найти оптимальную толщину фольги или слоя в многослойной обмоткой. Формула применима к любой произвольной периодической кривой тока. Это вычисляется проще, по сравнению с анализом Фурье, и имеем ту же степень точности. Формула, в силу своей простоты и наглядности, имеет более широкий спектр применения, по сравнению с подходом Фурье.

## **ПОДТВЕРЖДЕНИЕ**

Профессор Херли хотел бы поблагодарить профессора J.G. Kassakian из Массачусетского технологического института за использование помещений в лаборатории электромагнитных и электронных систем, где была написана эта работа. Замечания Севернс Руди из Springtime Enterprises Inc. очень ценные.

Таблица II. Формулы для оптимальных толщин обмотки для различных форм тока,  $\Psi = (5\rho^2 - 1)/15$ ,  $p$  – количество слоёв

Форма тока	$I_{rms}$ и $I'_{rms}$	Ряд Фурье, $i(t)$	$\Delta_{opt}$
1. 	$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ $I'_{rms} = \frac{2\pi}{T\sqrt{2}} I_0$	$\text{Sin}(\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{1}{\Psi}}$
2. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{D}{2}}$ $I'_{rms} = I_0 \frac{\pi}{DT} \sqrt{\frac{D}{2}}$	$\frac{2DI_0}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4DI_0}{\pi} \left\{ \frac{\text{Cos}(n\pi D)}{(1-4n^2D^2)} \right\} \text{Cos}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{4D^2}{\Psi}}$
3. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{D}{2}}$ $I'_{rms} = I_0 \frac{\pi}{DT} \sqrt{\frac{D}{2}}$	$\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{4DI_0}{\pi} \left\{ \frac{\text{Cos}(n\pi D/2)}{(1-4n^2D^2)} \right\} \text{Cos}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{D^2}{\Psi}}$
4. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{1 - \frac{8t_r}{3T}}$ $I'_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{4}{t_r T}}$	$I_0 (2D - 1) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_0}{n\pi} \text{Sin}(n\pi D) \times \text{Sinc}\left(n\pi \frac{2t_r}{T}\right) \text{Cos}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\left[1 - \frac{8t_r}{3T}\right] \pi^2 \frac{t_r}{T}}{\Psi}}$
5. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{D - \frac{4t_r}{3T}}$ $I'_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{2}{t_r T}}$	$I_0 \left(D - \frac{t_r}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_0}{n\pi} \text{Sin}\left(n\pi \left(D - \frac{t_r}{T}\right)\right) \times \text{Sinc}\left(n\pi \frac{2t_r}{T}\right) \text{Cos}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\left[D - \frac{8t_r}{3T}\right] 2\pi^2 \frac{t_r}{T}}{\Psi}}$
6. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{D - \frac{8t_r}{3T}}$ $I'_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{4}{t_r T}}$	$\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{4I_0}{n\pi} \text{Sin}\left(n\pi \left(\frac{D}{2} - \frac{t_r}{T}\right)\right) \times \text{Sinc}\left(n\pi \frac{t_r}{T}\right) \text{Cos}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\left[D - \frac{8t_r}{3T}\right] \pi^2 \frac{t_r}{T}}{\Psi}}$
7. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{1}{3}}$ $I'_{rms} = \frac{2I_0}{T\sqrt{D(1-D)}}$	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_0 \text{Sin}(n\pi D)}{\pi^2 n^2 D(1-D)} \text{Sin}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\pi^2 D(1-D)}{3\Psi}}$
8. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{D}{3}}$ $I'_{rms} = \frac{2I_0}{\sqrt{DT}}$	$\frac{I_0 D}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_0}{\pi^2 n^2 D} \text{Sin}^2\left(\frac{n\pi D}{2}\right) \text{Cos}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\pi^2 D}{3\Psi}}$
9. 	$I_{rms} = I_0 \sqrt{\frac{D}{3}}$ $I'_{rms} = \frac{4I_0}{\sqrt{DT}}$	$\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{16I_0}{\pi^2 n^2 D} \text{Sin}^2\left(\frac{n\pi D}{4}\right) \text{Cos}(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\pi^2 D}{12\Psi}}$

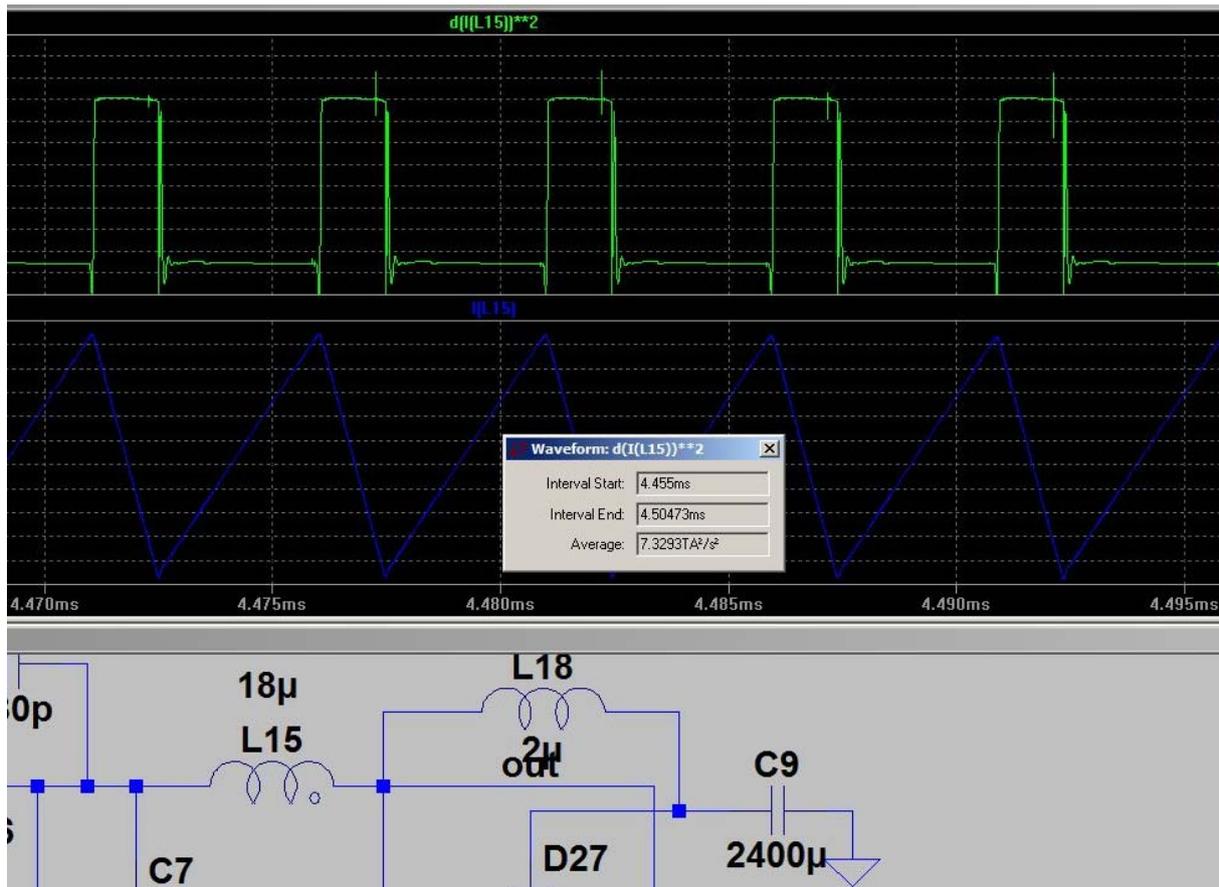
• В кривой 2 для  $n = k = 1/2D \in \mathbb{N}$  (набор натуральных чисел), и в кривой 3 для  $n = k = 1/D \in \mathbb{N}$ , {выражение в фигурных скобках} заменено на  $n^2/16$ .

## ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

предложенной методики с симулятором LTspice

К сожалению в таблице II не приводятся аналитические зависимости для формы тока с постоянной составляющей, характерной для дросселя, работающего в составе LC-фильтра DC-DC преобразователя. Оптимальную толщину можно вычислить, воспользовавшись формулой 22. Но для этого нужно определить действующее значение от производной тока. В LTspice отсутствует встроенная возможность определения этого значения. Однако в LTspice (как впрочем и во многих других симуляторах) есть возможность математической обработки результатов моделирования.

Чтобы вычислить действующее значение некоторой функции, мы должны взять интеграл от квадрата этой функции, а затем извлечь из этого значения корень. Так и поступим.



Здесь изображен фрагмент выпрямителя с дросселем фильтра L15. На нижнем графике видно кривую тока дросселя  $I(L15)$ , а на верхнем кривую производной от этого тока, возведённой в квадрат  $d(I(L15))^{**2}$ . Кликнув по  $d(I(L15))^{**2}$ , в присутствии нажатой клавиши **Ctrl**, получим интеграл (Average) от этого значения  $7.3292TA^2/S^2$  (т.е.  $7329200000000 A^2/S^2$ ). Извлекаем из этого значения корень и получаем действующее значение производной тока  $I'_{rms}=2700249.5 A/S$

Учитывая, что дроссель имеет  $p=8$  витков, действующее значение тока  $I_{rms}=40A$ , частота пульсации  $200000Гц$ , круговая частота будет  $\omega = 2 \times \pi \times 200000 = 1256637$  рад-сек и глубина скин-слоя  $0.17$  мм.

Вычисляем параметр

$$\Psi = (5 \cdot p^2 - 1) / 15 = 21.27$$

Оптимальное значение

$$\Delta_{opt} = \frac{1}{\sqrt[4]{\Psi}} \sqrt{\frac{\omega \cdot I_{rms}}{I'_{rms}}} = \frac{1}{\sqrt[4]{21.27}} \sqrt{\frac{1256637 \cdot 40}{2700249.5}} = 2$$

Следовательно, в данном случае, оптимальная толщина фольги равна удвоенной толщине скин-слоя, т.е.  $0.34$ мм

Перевел статью и сделал пример использования Валентин Володин

<http://valvolodin.narod.ru>

## Список литературы

- [1] W.G. Hurley, W.H. Wolfe, J.G. Breslin, "Optimized Transformer Design: Inclusive of High Frequency Effects", IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, no. 4, pp. 651-659, July 1998.
- [2] E. Bennett, S.C. Larson, "Effective Resistance to Alternating Currents of Multilayer Windings", Trans. of AIEE, vol. 59, pp. 1010-1016, 1940.
- [3] P.L. Dowell, "Effect of Eddy Currents in Transformer Windings", IEE Proc., vol. 113, no. 8, pp. 1387-1394, August 1966.
- [4] J.G. Kassakian, M.F. Schlecht, "High-Frequency High-Density Converters for Distributed Power-Supply Systems", Proc. of the IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 362-376, April 1988.
- [5] C.R. Sullivan, S.R. Sanders, "Design of Microfabricated Transformers and Inductors for High-Frequency Power Conversion", IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, no. 2, pp. 228-238, March 1996
- [6] R. Williams, D.A. Grant, J. Gowar, "Multielement Transformers for Switched-Mode Power-Supplies: Toroidal Designs, IEE Proceedings, Pt. B, vol. 140, no. 2, pp. 152-160, March 1993
- [7] K.W.E. Cheng, P.D. Evans, "Calculation of Winding Losses in High-Frequency Toroidal Inductors Using Multistrand Conductors", IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 142, no. 5, pp. 313-322, September 1995.
- [8] P.D. Evans, W.M. Chew, "Reduction of Proximity Losses in Coupled Inductors", IEE Proc. Pt. B, vol. 138, no. 2, pp. 51-58, March 1991.
- [9] D.C. Hanselman, W.H. Peake, "Eddy-Current Effects in Slot-Bound Conductors", IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 142, no. 2, pp. 131-136, March 1995.
- [10] P.S. Venkatraman, "Winding Eddy Current Losses in Switch Mode Power Transformers Due to Rectangular Wave Currents", Proc. of Powercon 11, section A-1, pp. 1-11, 1984.
- [11] B. Carsten, "High Frequency Conductor Losses in Switchmode Magnetics", HPFC Proc., pp. 155-176, May 1986.
- [12] J. Vandelac, P.D. Ziogas, "A Novel Approach for Minimizing High-Frequency Transformer Copper Losses", IEEE Trans. Power Electron., vol. 3, no. 3, pp. 266-276, July 1988.
- [13] J.A. Ferreira, "Improved Analytical Modelling of Conductive Losses in Magnetic Components", IEEE Trans. Power Electron., vol. 9, no. 1, pp. 127-31, January 1994.
- [14] J. Jongsma, "Minimum Loss Transformer Windings for Ultrasonic Frequencies, Part 3: Transformer Winding Design", Phillips Electronics Applications Bulletin, vol. E.A.B. 35, pp. 21 1-226, 1978.
- [15] Charles R. Sullivan, "Optimal Choice for Number of Strands in a Lib-Wire Transformer Winding", in 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 28-35, 1997.
- [16] E.C. Snelling, Soft Ferrites, Properties and Applications, Butterworths, second edition, 1988.