

АНАЛІЗ ВТРАТ В ДРОСЕЛЯХ-НАКОПИЧУВАЧАХ

А. VDOVICHENKO

CHOKE LOSSES ANALYSIS

Анотація. Підвищення ККД і зменшення габаритів сучасних імпульсних перетворювачів вимагає знань про джерела втрат. Ставиться завдання виміру втрат в дросельних елементах і їх аналіз, розглядаються втрати в дроселях-накопичувачах з подальшим розділенням цих втрат на складові, а також причини, якими вони обумовлені, розглянуті основні втрати - в осерді і в обмотці, а також їхні складові: втрати на перемагнічування, втрати на вихрові струми в матеріалі осердя, втрати в провідниках обмотки на постійному струмі, втрати від скін-ефекту та від ефекту близькості.

Ключові слова: зниження втрат, дроселі-накопичувачі, імпульсні джерела живлення.

Анотация. Повышение КПД и уменьшение габаритов современных импульсных преобразователей требует знаний об источниках потерь. Ставится задача измерения потерь в дросельных элементах и их анализ, рассматриваются потери в дроселях-накопителях с последующим разделением этих потерь на составляющие, а также причины, которыми они обусловлены, рассмотрены основные потери - в сердечнике и в обмотке, а также их составляющие: потери на перемагничивание, потери на вихревые токи в материале сердечника, потери в проводниках обмотки на постоянном токе, потери от скин-эффекта, и потери из-за эффекта близости.

Ключевые слова: снижение потерь, дросели-накопители, импульсные источники питания.

Annotation. Increased efficiency and downsizing of modern pulse converters require knowledge of the losses sources. Measure the losses in the inductor elements and analyzing them, are considered in the choke loss, followed by separation into components of these losses and why they caused, the basic loss - in the core and winding, and their components: magnetic reversal losses, loss of vortex currents in the material core, the loss due to windings DC ohmic resistance, losses from skin effect in winding wire, and losses due to proximity effect.

Key words: lower losses, choke, switching power supplies.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Питання економії електроенергії є одним з найважливіших у сучасному світі, тому в наші дні до джерел електроживлення висувають все більш жорсткі вимоги щодо збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД).

Сьогодні найперспективнішим видом джерел живлення є імпульсні джерела, які мають велику кількість значних переваг порівняно з класичними джерелами електроживлення із застосуванням трансформаторів, випрямлячів і стабілізаторів.

Найголовніша перевага імпульсних джерел полягає в тому, що їхній ККД може досягати 80...90%, що не зіставне з ефективністю роботи інших типів джерел. Наприклад, ККД лінійних джерел із застосуванням напівпровідникових стабілізаторів не перевищує 50%. Крім того, імпульсні джерела мають порівняно малі габарити і вагу, оскільки працюють на високій частоті перетворення електричної енергії. Незважаючи на те, що ККД імпульсних джерел наближається до ста відсотків, в даний час йде боротьба за кожен відсоток, тому головним є питання зниження втрат у всіх вузлах цих джерел. Такі елементи, як дроселі, використовуються в усіх типах імпульсних джерел живлення. Поряд з дроселями в схемах джерел живлення використовуються

напівпровідникові елементи, такі як транзистори і діоди. Завдяки тому, що напівпровідникові технології швидко розвиваються, втрати в цих елементах можна звести до мінімуму.

На разі проблема збільшення ККД всієї схеми зводиться до завдання – знизити втрати в дросельному елементі.

Втрати в дроселі залежать від матеріалу і геометрії осердя, від матеріалу і геометрії обмотки і від способу намотування дроту дроселя. При неправильній конструкції дроселя в ньому на високих частотах виникають значні втрати, які виділяються у вигляді тепла і знижують ККД всієї схеми.

Втрати в дроселях-накопичувачах мають декілька складових, тому при конструюванні дроселя для зниження втрат в ньому необхідно знати, яка(і) складова(і) домінує(ють), щоб згодом внести відповідні корективи до процесу конструювання.

В сучасній літературі майже не висвітлені втрати в дроселях-накопичувачах із одразу всіма складовими, можна знайти лише ґрунтовний опис окремих складових [1,2]. Розглянемо всі втрати в дроселях-накопичувачах з подальшим розділенням цих втрат на складові, а також причини, якими вони обумовлені. Варто також відзначити, що в даній роботі дросель-накопичувач розглядатиметься як «чорний ящик», тобто як деякий об'єкт, розібрати який, щоб «заглянути» всередину, неможливо (в даній час більшість виробників конструюють свої дроселі саме так, що розібрати їх, не нанісши дроселю значних пошкоджень, не можна). Тому завдання щодо визначення втрат може розглядатися як завдання неруйнівного контролю.

Формулювання мети

Основна мета публікації – це постановка завдання виміру втрат в дросельних елементах і їх аналіз.

Як відомо, в реальному дроселі, окрім основного ефекту взаємодії струму і магнітного поля, спостерігаються паразитні ефекти, унаслідок яких опір котушки при дії, наприклад, синусоїдальних струмів не є чисто реактивним і стає рівним $Z=jX_L+r$, де X_L – реактивний опір дроселя, r – опір активних втрат [3]. Саме цей опір і визначає втрати в дроселі, які виділяються в ньому у вигляді тепла і знижують спільний ККД. Відзначимо, що опір r непостійний і в загальному випадку є функцією частоти і струму дроселя.

Надалі під словом «втрати» матимемо на увазі потужність втрат в дроселі, яка визначається за наступним виразом:

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad (1)$$

де P_{Σ} – сумарна потужність втрат;
 $u(t)$ – змінна напруга на дроселі;
 $i(t)$ – струм через дросель;
 T – період змінних сигналів $u(t)$ і $i(t)$.

Для вирішення завдання про вимірювання і розділення втрат в дроселі-накопичувачі необхідно проаналізувати причини виникнення активного опору r . Втрати в реальному дроселі можна розділити на втрати в осерді і втрати в обмотці [4]. В свою чергу, втрати в осерді включають втрати на перемагнічування і втрати від вихрових струмів, що наводяться в провідному матеріалі осердя. Втрати в обмотці дроселя підрозділяються на омичні втрати в дроті обмотки на постійному струмі, втрати від скін-ефекту і втрати від ефекту близькості. Таким чином, спільні втрати в реальному дроселі мають п'ять складових і можуть бути записані в наступному вигляді:

$$P_{\Sigma} = P_{осерд} + P_{обм} = (P_{\Pi} + P_{BC}) + (P_r + P_{CE} + P_{EB}), \quad (2)$$

де $P_{осерд}$ та $P_{обм}$ – втрати в осерді і в обмотці відповідно, і вони містять в собі наступні складові:
 P_{Π} – втрати на перемагнічування;
 P_{BC} – втрати на вихрові струми в матеріалі осердя;
 P_r – втрати через омичний опір обмотки на постійному струмі;
 P_{CE} – втрати від скін-ефекту в дроті обмотки;
 P_{EB} – втрати через ефект близькості.

Тепер розглянемо детальніше кожен складову втрат з формули (2).

1 Втрати в осерді

У дросельних елементах імпульсних джерел живлення в більшості випадків осердя виконане з феромагнітних матеріалів, що мають гістерезис. При періодичному перемагнічуванні у феромагнітному матеріалі виникають втрати, які визначаються площею петлі гістерезису [4].

Крім того, феромагнітні матеріали мають електричну провідність, тому в змінному магнітному полі в них наводяться вихрові струми, які нагрівають осердя і, отже, спричиняють появу втрат. Розглянемо окремо ці два види втрат в осерді.

1.1 Втрати в осерді при перемагнічуванні. Фізично втрати перемагнічування, обумовлені гістерезисом, пов'язані з витратою енергії на поворот окремих магнітних доменів в матеріалі сердечника [3].

У загальному випадку феромагнітний матеріал під дією магнітного поля з індукцією B і напруженістю H має петлю гістерезису наступного вигляду (рис.1):

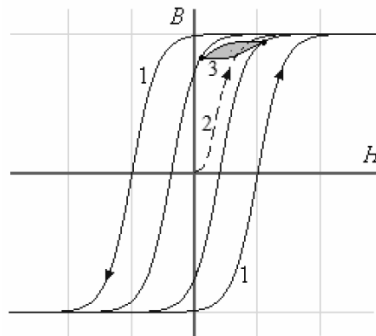


Рис. 1. Петля гістерезису

Крива 1 називається граничним циклом, крива 2 (штрихова лінія) – основною кривою намагнічення, а затемнена область 3 є несиметричним «окремим випадком» циклу перемагнічування. Струм i через дросель в імпульсних джерелах живлення в загальному випадку має наступний вигляд (рис.2) [5-7]:

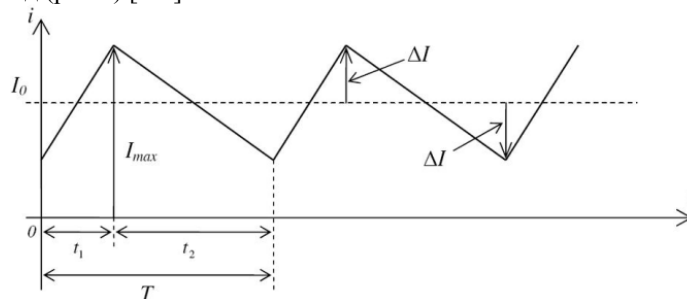


Рис. 2. Струм через дросель

З рис.2 видно, що струм має трикутну форму з періодом T , постійною складовою I_0 і амплітудою пульсацій ΔI . Отже, центр «окремого випадку» циклу перемагнічування не збігається з початком координат через постійну складову магнітної індукції, пропорційну I_0 , а сам цей цикл виглядає приблизно як затемнена область 3 на рис.1. Ширина цього «окремого випадку» циклу визначається величиною пульсацій струму через дросель ΔI .

Втрати в осерді від перемагнічування визначаються площею «окремого випадку» циклу 3, по якому відбувається перемагнічування матеріалу.

1.2 Втрати в сердечнику на вихрові струми. Оскільки в обмотці дроселя протікає змінний струм, то він створює змінне магнітне поле. Це магнітне поле замикається через осердя дроселя. Осердя має електричну провідність, тому, за законом електромагнітної індукції, змінне магнітне поле наведе в провідному матеріалі осердя вихрові струми. Ці струми спричиняють нагрів осердя, і, як зазначалося вище, призводять до додаткових втрат [1].

2 Втрати в обмотці

Втрати в обмотці, на відміну від втрат в осерді, існують і на постійному струмі і визначаються омичним опором дроту обмотки. Проте на змінному струмі ці втрати значно зростають із

зростанням частоти і можуть на декілька рівнів перевищувати втрати на постійному струмі. На змінному струмі втрати зростають через вплив скін-ефекту і ефекту близькості.

Розглянемо окремо кожну із складових втрат в обмотці дроселя.

2.1 Втрати в обмотці на постійному струмі. Опір R дроту обмотки на постійному струмі (DC) визначається виходячи з даних про матеріал і геометрію дроту:

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{S}, \quad (3)$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу дроту обмотки;
 l – довжина дроту обмотки;
 S – площа поперечного перетину дроту обмотки.

Слід також пам'ятати, що електричний опір металів залежить від температури T і може бути розрахований за наступною формулою:

$$R_{DC}(T) = R_{DC0}(1 + \alpha T), \quad (4)$$

де R_{DC0} – опір металу при 273 К;
 α – температурний коефіцієнт опору даного металу.

Для металів коефіцієнт α завжди більше нуля і залишається практично постійним в широкому діапазоні температур (наприклад, для міді температурний коефіцієнт опору α дорівнює 0,004/°C), тому

$$R_{DC} \geq R_{DC0}.$$

2.2 Втрати в провідниках від скін-ефекту. Для синусоїдальних сигналів розподіл вихрових струмів J в циліндричному провіднику залежно від радіальної координати r описується рівнянням:

$$J = k H_0 \frac{I_1(kr)}{I_0(x)}, \quad (5)$$

де $k = \sqrt{-j\omega\mu_a\sigma}$ – параметр;

μ_a – абсолютна магнітна проникність матеріалу провідника;

H_0 – напруженість магнітного поля на поверхні провідника;

I_0 і I_1 – модифіковані функції Бесселя першого роду відповідного нульового і першого рівнів;

$x = kr_0$ – узагальнений параметр;

r_0 – радіус провідника.

Пояснити фізику процесу виникнення вихрових струмів в провіднику можна таким чином. На рис.3 зліва показано магнітне поле (його силові лінії) усередині і довкола провідника з постійним струмом або із струмом низької частоти. Провідник віднесений далеко від інших джерел електромагнітного поля.

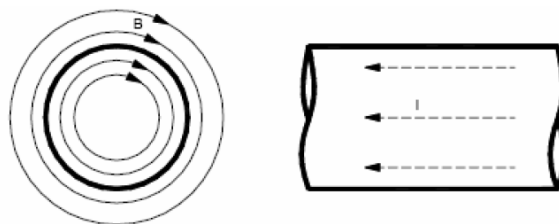


Рис. 3. Ізольований провідник із струмом

За низької частоти енергія магнітного поля незначна, тому струм розподілений рівномірно по перетину провідника. Штрихові лінії показують однорідний розподіл низькочастотного струму.

Рис. 4 дає узагальнену картину і пояснює, що відбувається при зростанні частоти.

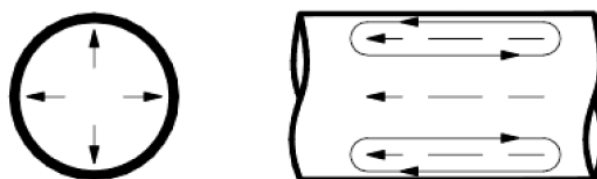


Рис. 4. Вихрові струми в дроті на високій частоті

При швидкій зміні струму (за високої частоти) поле усередині провідника змінюється так само швидко. Зміну поля спричиняє поява вихрових струмів, які показані суцільними лініями на рис.4 поблизу поверхні дроту. Відзначимо тепер, що напрям вихрового струму збігається з напрямом основного струму на поверхні, але протилежний йому в центрі дроту. В результаті при підвищенні частоти щільність струму зростає на поверхні дроту і зменшується в центрі. Струм експоненціально зменшується в напрямку середини дроту. Частина дроту, що фактично переносить струм, зменшується, і опір на високій частоті (і, відповідно, втрати) стають значно вищими, ніж за низької частоти.

Розподіл щільності струму J в провіднику оцінюється глибиною проникнення δ , яка визначається як відстань від поверхні, на якій щільність струму становить $1/e$ від щільності струму на поверхні.

Відмітимо, що модуль узагальненого параметра $|x| = |kr_0| = r_0 \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ пов'язаний з глибиною проникнення $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}}$ плоскої електромагнітної хвилі співвідношенням $|x| = r_0 \sqrt{\frac{2}{\delta}}$. Це пояснюється тим, що, на відміну від плоскої хвилі, при поширенні циліндричної хвилі її фронт спотворюється, хвиля неначе «стягується» до осі циліндра, проникаючи глибше, ніж плоска хвиля в просторі при однакових значеннях параметра k .

Розрахунок глибини проникнення електромагнітної хвилі в циліндричний провідник можна робити за формулою для глибини проникнення плоскої хвилі тільки на досить високих частотах, коли значення $|kr_0| \geq 10$.

Точний розрахунок глибини проникнення u циліндричної електромагнітної хвилі проводиться за допомогою співвідношення повного внутрішнього опору провідника на одиницю довжини, яке визначається як:

$$Z_i = R_i + jX_i = \frac{kI_0(kr_0)}{\sigma 2\pi r_0 I_1(kr_0)}. \quad (6)$$

Глибина проникнення електромагнітного поля в циліндричний провідник розраховується як:

$$u = r_0 - \sqrt{r_0^2 - \frac{1}{\pi \sigma R_i}}. \quad (7)$$

2.3 Втрати в дротах через ефект близькості. При розгляданні ефекту близькості в котушках індуктивності вводиться поняття шарів струму, які є провідниками, що знаходяться в одному і тому ж шарі намотування [2].

Звернемося до рис.5. Тут зображена модель дроселя з двошаровою обмоткою. Набір провідників в кожному шарі представлений у вигляді шару струму з прямокутним перетином (шар 1 і шар 2), так, неначе обмотка була виконана із смужки фольги.

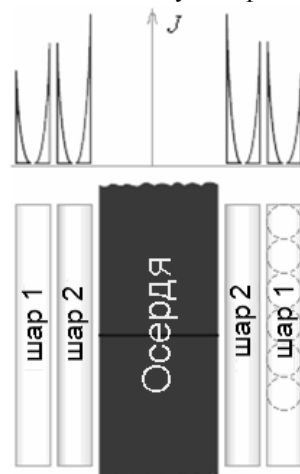


Рис. 5. Ефект близькості в двошаровій обмотці

Якщо, наприклад, в шарі 2 в площині, перпендикулярній площині малюнка, тече змінний струм від зовнішнього джерела, то він наводить в шарі 1 (по суті, в тому ж дроті) вихрові струми за рахунок змінного магнітного поля, яке оточує шар 2. Але в шарі 1 також тече змінний струм

(той же струм від зовнішнього джерела, що і в шарі 2), отже, з цього струму відніматимуться ті самі вихрові струми, створені шаром 2.

Оскільки струм в обмотці є змінним, то в цьому провіднику виникає скін-ефект, але в результаті явищ, описаних вище, картина розподілу щільності струму J по перетину дроту, характерна для звичайного скін-ефекту, спотворюється і набуває вигляду, зображеного у верхній частині рис.5. В результаті, в обмотці виникають додаткові втрати через змінний струм, обумовлені вже не лише скін-ефектом, а і його сукупністю з ефектом близькості.

Варто також відзначити, що ефект близькості має тенденцію ставати домінуючим в утворенні втрат на високих частотах, особливо коли обмотки багат шарові.

Ефект близькості відсутній тільки тоді, коли є одношарова обмотка без провідного осердя.

Відмінність ефекту близькості від скін-ефекту полягає в тому, що ефект близькості виникає в результаті дії зовнішнього змінного поля одного провідника на інший провідник із змінним струмом, а скін-ефект виникає в результаті процесів, що відбуваються усередині окремого провідника і залежить тільки від частоти струму і властивостей матеріалу даного провідника. Тому для зниження впливу ефекту близькості необхідно правильно конструювати обмотку, щоб зовнішні поля сусідніх провідників якомога менше впливали одне на одного.

Важливо з'ясувати характер залежності втрат, спричинених ефектом близькості, від частоти. Характер цієї залежності можна пояснити на простому прикладі.

Розглянемо плоске замкнуте кільце із площею s з провідного матеріалу, що знаходиться в змінному магнітному полі. Поле направлене перпендикулярно площині кільця (рис.6).

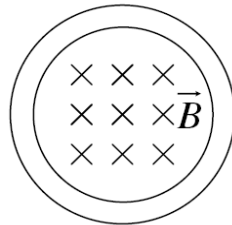


Рис. 6. Провідне кільце в змінному магнітному полі

Якщо передбачити, що закон зміни магнітної індукції $B(t)$, наприклад, синусоїдальний, тобто

$$B(t) = B_m \sin(\omega t),$$

де ω – кутова частота;

B_m – амплітудне значення,

то значення наведеної в кільці ЕРС $e(t)$ можна записати як $e(t) = -s \frac{dB(t)}{dt} = -s\omega B_m \cos(\omega t)$, де s -

площа перерізу кільця. Тоді струм $i(t)$ в кільці визначається його активним опором r і має вираз:

$$i(t) = -\left(\frac{s\omega}{r} B_m\right) \cos(\omega t) = -I_m \cos(\omega t),$$

де I_m – амплітудне значення.

Активна потужність P в цьому випадку дорівнює:

$$P = \frac{I_m^2 r}{2} = \frac{s^2 \omega^2 B_m^2}{2r}. \quad (8)$$

З виразу (8) видно, що втрати від наведеного струму в провідному кільці пропорційні квадрату амплітуди струму і квадрату частоти змінного магнітного поля.

Висновки

Підвищення ККД сучасних імпульсних перетворювачів вимагає знань про джерела втрат. Економічний ефект досягається за рахунок зменшення ваги, габаритів, підвищення ККД оптимально спроектованих внаслідок системного дослідження елементів перетворювачів. Необхідно розробити систему, яка здатна вимірювати з високою точністю потужність в елементах, розділяти втрати на складові, вимірювати напругу, струм, коефіцієнт потужності і інші характеристики сигналів.

В статті ставиться завдання виміру втрат в дросельних елементах і їх аналіз, розглядаються втрати в дроселях-накопичувачах з подальшим розділенням цих втрат на складові, а також

причини, якими вони обумовлені. Розглянуті основні втрати - в осерді і в обмотці, а також їхні складові: втрати на перемагнічування, втрати на вихрові струми в матеріалі осердя, втрати через омичний опір обмотки на постійному струмі, втрати від скін-ефекту в дроті обмотки та втрати внаслідок ефекту близькості.

Враховуючи розглянуті складові втрат в дроселях-накопичувачах і причини їх виникнення, необхідно розробити прилад і методику, які дозволять вимірювати повні втрати і розподіляти їх на складові, не руйнуючи сам дросель. Це дасть можливість визначити, яка конструкція дроселя зменшить складові загальних втрат.

Література

1. Ali M. Niknejad, Robert G. Meyer. Analysis of Eddy-Current Losses Over Conductive Substrates with Applications to Monolithic Inductors and Transformers. (Аналіз втрат на вихрові струми провідних поверхонь в монолітних індуктивностях та трансформаторах) // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. - Vol. 49, № 1. - P. 166 – 176.
2. Рей Рідлі. Втрати в обмотках внаслідок ефекту близькості // Сучасна електроніка. - 2005. - №6. - С. 60-64.
3. U. Tietze, Ch. Schenk. Halblieterschaltungstechnik. Посібник з практичної електроніки. - 1989.
4. Довідник Epcos “Ferrite und Zubehor” (Ферити і осердя).- 2002.
5. П. Хоровіц, У.Хилл. Мистецтво схемотехніки. Т1 - Т2. - М.: Мир, 1998. – 590 с.
6. А.Г. Полікарпенко, Е.Ф. Сернієнко. Імпульсні регулятори і перетворювачі постійної напруги. - М.: МЭИ. - 1998.
7. Высоочастотные транзисторные преобразователи. / Э.М.Ромаш, Ю.И.Драбович, Н.Н.Юрченко, П.Н.Шевченко -М.:Радио и связь. -1988.-288с.