СЪОБРАЖЕНИЯ ПРИ ИЗБОР НА ИНДУКТИВНОСТ В DC/DC ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ В СИЛОВАТА ЕЛЕКТРОНИКА

Даниела Марева
Бургаски свободен университет

INDUCTANCE SELECTION CONSIDERATIONS IN DC/DC CONVERTERS IN POWER ELECTRONICS

Daniela Mareva
Burgas Free University

Abstract: *DC/DC преобразувателите са изключително популярни, а правилата и изчисленията, на които се подчинява тяхното проектиране са трудни при прилагането им. Широкото им използване дава предизвикателства към създателите на междинни захранвания, тъй като почти всички основни правила и изчисления са компилицирани и зависят от определени условия, с които трябва да се съобразят в процеса на работа.*

Keywords *– inductor, converters, designing.*

Целта на производителите на силови индуктори е да намалят загубите в сърцевината в приложения за преобразуване на напрежение. Тези индуктори работят и в среда с магнитно поле, създадено от плътно навита намотка, за да се получава или съхранява енергия, да намалява загубите в системата и да филтрира EMI шума.

Основната цел на силовия индуктор е да участва в електрическа верига, през която тече променлив ток или има напрежение. Различните типове силови индуктори се категоризират по следните фактори:

- DC съпротивление;
- толерантност;
- размер на кутията;
- номинална индуктивност;
- конструкция и екраниране;
- максимален номинален ток

Различните силови индуктори се използват за специфични приложения въз основа на технически характеристики като: захранване, висока мощност, мощност за повърхностен монтаж (SMD) и висок ток. В приложения, които трябва да преобразуват напрежение, докато енергията се съхранява и EMI токовете се филтрират, е необходимо да се използват SMD силови индуктори.

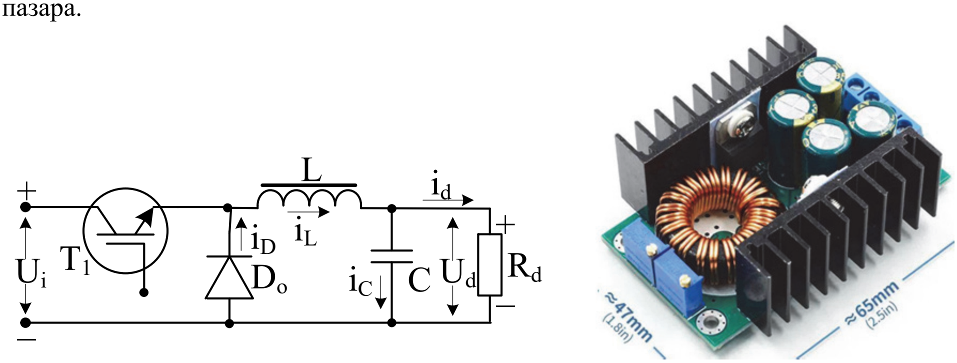
Приложения на захранващи индуктори.

Трите основни начина, по които може да се използва захранващ индуктор са:
- филтриране на EMI шум във входове за променлив ток;
- филтриране на шум от нискочестотен пулсиращ ток;
- съхраняване на енергия в преобразуватели DC-to-DC.

Филтрирането се основава на особености при типове мощностни индуктори. Устройствата при функционирането си, обикновено съдържат пулсиращ ток и високи пикове на тока. Поради широката гама от налични мощни индуктори, много важно е, изборът да се определя от тока, при който сърцевината се насища и надвишава пиковия ток на индуктора, за приложението, в което се използва. Допълнителните фактори включват нива на мощност за напрежения и токове и изисквания за индуктивност и ток.

Във високочестотните DC/DC преобразуватели се използват индуктори във филтрите за променлив ток, с наличие в него на пулсации, които са насложени върху постояннотоковото изходно напрежение. Без значение дали преобразувателят е понижаващ, повишаващ или и повишаващо-понижаващ, индукторът изглажда пулсациите и осигурява псевдо постояннотоковото изходно напрежение. [3]

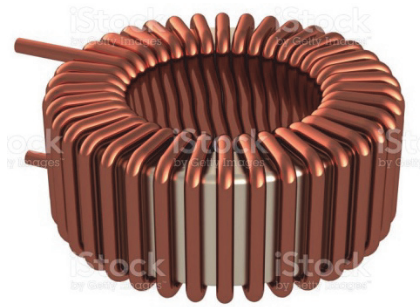
На фигура 1 е показана принципна схема на такъв тип преобразувател –понижаващ – DC/DC Buck конвертор и външния му вид в готово изделие предлагано на пазара.



Фиг. 1. Buck конвертор – DC/DC преобразувател – принципна схема и външен вид

В повечето съоръжения ефективността на индуктора е много важно съображение при проектирането на такива устройства. Тя е най-висока, когато комбинацията от загуби на сърцевина и намотка е най-ниска. Следователно, целта за най-висок коефициент на полезно действие се постига чрез избор на индуктор (бобина) в групата на пасивния филтър, който осигурява достатъчна индуктивност за изглаждане на пулсациите на тока в изходното напрежение, като същевременно се цели минимизиране на загубите.

На фигура 2 е показан външният вид на един тип от индукторите, който е използван в преобразувателите.



Фиг. 2. Външен вид на индуктор

През индуктора трябва да преминава ток, който да не предизвиква насищане на сърцевината или прегряване на проводника в намотката му. Трудно се съобразяват загубите в сърцевината и намотката на индуктора, която е съставна част на филтъра. [3]

Загубите в сърцевината зависят от няколко фактора:

- пулсиращ ток с амплитуда от връх до връх (I_{pp});
- честота на пулсациите на тока (f_p);
- материал на сърцевината (A_c);
- размер на сърцевината (Φ_c);
- брой навивки (w_c).

Необходимата стойност на изходния ток с пулсации и честотата на пулсиращия ток зависят от спецификата на прилагането в принципната схема. Материалът, от който е направена сърцевината, размерът на сърцевината и броят на навивките, определят стойността на индуктивността на индуктора. Популярна зависимост определяща загубите в ядрото [3] е:

$$P_{Zc} = F_1(f).F_2(\mathrm{B}) \qquad [1]$$

където:

P_{zc} – загубна мощност в сърцевината [W];
f – е честота на тока [Hz];
B – плътност на потока [Wb];
$F_1(f)$ – функция на честотата в зависимост от материала на сърцевината;
$F_2(\mathrm{B})$ – функция на плътността на магнитния поток в зависимост от материала на сърцевината

Тази зависимост показва, че загубите в сърцевината зависят от честотата (f) и плътността на потока (B). От своя страна плътността на потока зависи от тока на пулсации. Тези две функции зависят от схемното решение на преобразувателя и неговата специфичност. Чрез него се изразява загубната мощност в сърцевината, която е избрана и параметрите на самата сърцевина, изразени с функциите $F_1(f)$ и $F_2(\mathrm{B})$. Необходимо е да се вземе под внимание, че плътността на потока е функция на площта на сърцевината (S_c) и броя на навивките (w). Може да се направи извод, че загубната мощност в сърцевината зависи много от спецификата на схемното решение и от конструкцията и параметрите на индуктора. [3]

В следната зависимост е показана загубната мощност в намотката на индуктора по постоянен ток:

$$P_{DC} = I_{DC}{}^{2}.R_{DC} \qquad [2]$$

където:

P_{DC} – постояннотокова мощност, разсеяна като топлина [W];

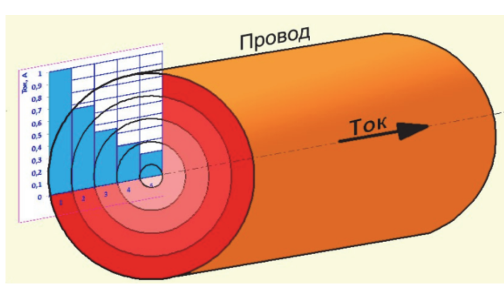
I_{DC} – средна стойност на постоянния ток през индуктора [A];

R_{DC} – съпротивление на проводника, с който е навит индуктора при постоянен ток [Ω];

Загубната мощност в намотката на индуктора по променлив ток трябва да включва ефектите от нарастване на вътрешното съпротивление на намотката на индуктора при по-високи честоти:

- скин-ефект (повърхностен ефект) се нарича ефектът на намаляване на амплитудата на електромагнитните вълни в зависимост от честотата, при тяхното проникване в дълбочина на сечението на проводника, през който протича ток. Като резултат от този ефект, променливият ток с по-висока честота, при протичането си не се разпределя равномерно в цялото сечение на проводника, а се разпределя със значителна плътност, предимно в повърхностния слой.

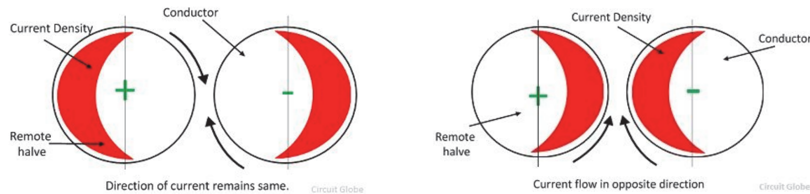
На фигура 3 е показано разпределение на тока по напречното сечение на проводника според скин ефекта.



Фиг. 3. Проводник с разпределение на тока според скин ефекта

- ефекта на близост – когато през проводниците преминава високочестотна променлива на напрежението, тогава токовете са неравномерно разпределени по площта на напречното сечение на проводника. Ефектът на близостта води до увеличаване на видимото съпротивление на проводника, поради наличието на други близки проводници, по които протича променлив ток.

На фигура 4 е показано разпределение на тока по напречното сечение на два, близко разположени проводника, според ефекта на близост.

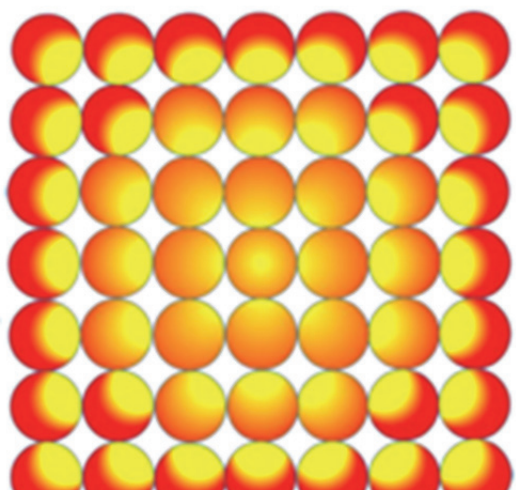


Фиг. 4. Проводници с разпределение на тока според ефекта на близост

Промяната на съпротивлението при високи честоти се поражда от ефективното серийно съпротивление и променливотоково съпротивление. Най-силна промяна има, когато през индуктора протичат по-големи токове, характерно при преобразувателите в силовата електроника.

Това съпротивление става достатъчно високо за токове с честоти над 1 MHz, което предизвиква много висока загуба, поради еквивалентното серийно съпротивление.

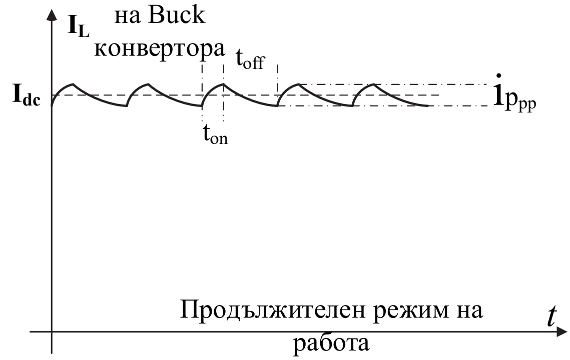
На фигура 5 е показано разпределение на тока по напречното сечение на пакет от проводници според двата ефекта.



Фиг. 5. Пакет от проводници с разпределение на тока според двата ефекта

Въз основа на това може да се приеме, че изходният ток при Buck конверторите е с относително малки пулсации при непрекъсната проводимост на индуктора в сравнение със средната стойност на този ток $Idc_{ср}$.

На фигура 6 е показана графика, онагледяваща наслагването на пусациите върху постоянното изходно напрежение във времето. Може да се разгледа като съставено от две съставни – постоянна и променлива. [3]



Фиг. 6. Идеализирана форма на напрежението на DC/DC преобразувател с малък пулсиращ ток

Приема се, че пулсационният ток от връх до връх е приемлив при около 10% от средната стойност на изходния ток.

За да се определят правилно загубите в индуктора, те трябва да се разделят на два основни компонента:

- Загуби при ниски честоти или при постоянен ток – използва се нискочестотно ефективно съпротивление (R_{DC}). В този случай токът на пулсации е малък, така че стойността е приблизително равна на постоянния ток на натоварване.

Загубната мощност при ниски честоти има следния израз:

$$P_{Z\text{нч}} = I_{DC}{}^2 . R_{DC} \qquad [3]$$

- Загуби при високи честоти. Загубната мощност при високи честоти имат следния израз:

$$P_{Z\text{вч}} = I_{C\text{кс}}{}^2 . R_{\text{ECC}} \qquad [4]$$

където:

$I_{C\text{кс}}$ – средноквадратична стойност на пулсиращия ток;

R_{ECC} – еквивалентно серийно съпротивление, проявяващо се съществено при по-високи честоти.

$$P_Z = P_{Z\text{нч}} + P_{Z\text{вч}} \qquad [5]$$

При работата на преобразувателя с работна честота f_p*=250 kHz* се предвиждат загуби около 1%, дължащи се предимно на постояннотоковото съпротивление. [3]

При работата на преобразувателя с работна честота f_p=5 MHz, загубите са почти същите. Но при изчисляването на загубите при променлив ток $P_{Z\text{вч}}$ се използва еквивалентното серийно съпротивление, което е изчислено и е около 10% от постояннотоковото съпротивление R_{DC}.

Така общите загуби на индуктор при 5 MHz също нарастват с 1,2% и са по-големи от $P_{Z\text{нч}}$ загубите, дължащи се на умножаване на R_{ECC} с целия ток на натоварване.

Ако се използва много по-малка индуктивност на индуктора „L“ ще се получи много по-малко R_{DC}.

Може да се направи заключението, че загубите в индуктора се изчисляват с комбинация от R_{DC} и R_{ECC}. При преобразуватели в режим на постоянен ток, в който пулсиращият ток е малък, в сравнение с тока на натоварване, загубите ще бъдат приемливи. Необходимо е, този пулсиращ ток, да се намали до приблизително 30% от тока на натоварване или по-малко. Дори и при изходни напрежения, с не много големи пулсации, не се наблюдават зависими от тока загуби в сърцевината при по-висок ток. Общите загуби в индуктора зависят най-вече от общата ефективност на индуктора.

Съвременните готови силови индуктори, които се предлагани на пазара са оптимизирани за приложения на преобразуватели и конвертори при високи честоти и висок пиков ток. Използва се меко насищане на сърцевината, като същевременно осигуряват ниски загуби на преобразувателите при променлив ток за работни честоти от 2 MHz и нагоре. Те също осигуряват достатъчно ниско променливотоково съпротивление в зависимост от габаритите им. [3]

При проектиране на DC-DC преобразуватели с по-опростена архитектура на схемното решение, може да се използват програмни продукти, изчисляващи стойността на изглаждащата индуктивност и големината на пиковия ток, преминаващ през нея, според условия на работа на устройството и приетия от проектанта приемлив променливотоков пулсиращ ток.

При избора на индуктивности (бобини) трябва да се вземат предвид следните параметри:

- стойност на индуктивността при пиков ток;
- номинален ток през нея;
- общи загуби в индуктора;
- загуби от температурата в индуктора.

При използване на готови програмни продукти при проектиране на мощни индуктивности се получават резултати като:

- загуби в сърцевината на проектирания индуктор;
- загуби в намотката на проектирания индуктор;
- стойностите на тока на насищане на проектирания индуктор

След първоначалното програмно изчисление е необходимо да се провери дали изчислената стойност за бобината съвпада с прогнозната стойност на пиковия ток. Чрез програмния продукт може да се симулира реакцията на индуктивността и от там да се направи избор на готовите, предлагани от фирмите индуктори с твърдо насищане, като се дава възможност за замяна с други типове с меко насищане. [3]

За да се постигне възможно най-голям коефициент на полезно действие на проектираното устройство, при избора на индуктивност първо е необходимо да се съобразят общите загуби, които се получават. Загубите в индуктора са непосредствено свързани с физическите параметри – размер на сърцевината и дебелина на проводника.

В повечето случаи, най-ниски загуби се получават, при по-голям размер на сърцевината с твърдо насищане. Необходимо е да се направят редица компромиси с размера или индуктивността при пиков ток, спрямо коефициента на полезно действие на устройството. [3]

Заключение

1. Проектирането на устройство с най-голям коефициент на полезно действие, налага избор на индуктори с най-ниски общи загуби в реални условия на работа на устройствата.
2. Изполването на специализиран софтуер дава възможност по-лесно да се прави избор, сравнение и анализ на индуктивности и тяхното приложение.

Литература:

1. Irving M. Gottlieb, Power Supplies, Switching Regulators, Inverters, and Converters,
2. Marty Brown, Practical Switching Power Supply Design, Academic Press, 1990.
3. Choosing Inductors for Energy Efficient Power Applications Revised 07/16/20
4. Marty Brown, Power Supply Cookbook, Butterworth-Heinemann, 1994.
5. Abraham I. Pressman, Switching Power Supply Design, McGraw-Hill, 1991.
6. https://cupdf.com/document/buck-converter-design-demystified.html
7. How to select external components for DC/DC Converters Technical Information Paper
8. https://www.coilcraft.com/en-us/other/xal-or-xfl-or-xgl/
9. https://www.coilcraft.com/en-us/tools/dc-dc-optimizer
10. https://www.coilcraft.com/en-us/tools/power-inductor-finder