

Měření parametrů výkonových pasivních součástek

Ing. Pavel Hrzina, ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická

V tomto článku se autor zabývá měřením parametrů cívek a kondenzátorů používaných ve spínaných zdrojích (SMPS – Switch Mode Power Supply) malého a středního výkonu. K základní identifikaci fyzikálních parametrů pasivních součástek, jako je odpor, indukčnost a kapacita, se v technické praxi většinou využívají digitální RLC-metry. V následujícím textu bude uvedena alternativní cesta ke zjišťování některých parametrů cívek a kondenzátorů, kterou lze podle přesvědčení autora dosáhnout výsledků lépe odpovídajících skutečným provozním podmínkám výkonových součástek.

Cívky

V návrhářské praxi spínaných zdrojů je nutné často řešit problém výběru vhodného indukčního prvku. Automatizovaný návrh spínaného zdroje provedený některým z běžně dostupných programů většinou poskytuje údaj o indukčnosti cívky a případně maximální dovolené indukci. Výběr vhodného materiálu jádra, provedení vinutí a vzduchové mezery zcela závisí na zkušenostech návrháře. Výrobci magnetických obvodů poskytují pouze omezené informace, založené ve většině případů na chování jejich magnetika ve střídavém magnetickém poli, které je vyvoláno proudem sinusového průběhu. Tyto hodnoty jsou pro návrh běžných spínaných zdrojů takřka nepoužitelné a je nutné zavádět opravy s cílem určení přibližných parametrů magnetik při nesinusovém průběhu obvodových veličin. Úpravy hodnot mají velmi často povahu různých empirických koeficientů. Pro určení skutečného chování cívky v obvodu SMPS je tedy vhodnější provést odpovídající měření. V následujících odstavcích bude popsána metodika tohoto měření.

Popis měřicí metody

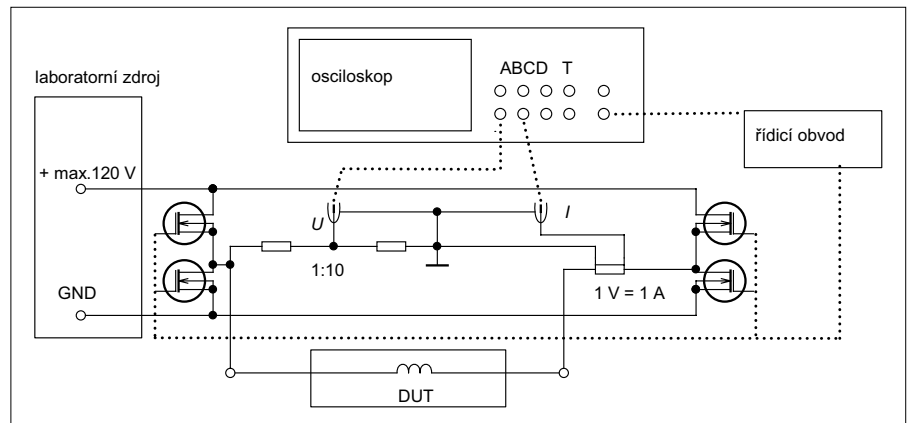
Indukčnost cívek při měření běžným měřicím přístrojem se určuje např. rezonanční metodou, tedy ze vztahu:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Takové určení indukčnosti lze považovat za velmi přesné – za předpokladu dostatečně přesného etalonu kapacity a kvalitního měření frekvence. Hlavní nevýhodou této metody pro měření cívek vhodných jako indukčnosti

spínaných zdrojů je především malé napětí na měřené cívkě a s tím související malý proud cívky. Při pohledu na závislost mezi indukčností cívky a proudem tekoucím cívku s feritovým jádrem je na první pohled patrná jasná nelinearita zapříčiněná sycením feritové-

nost považovat za parametr, který má blíže ke skutečné hodnotě než hodnota určená měřením malým signálem. Současné digitální osciloskopy umožňují dostatečně přesný záznam měřené veličiny při velké rychlosti vzorkování měřeného signálu. K vlastnímu



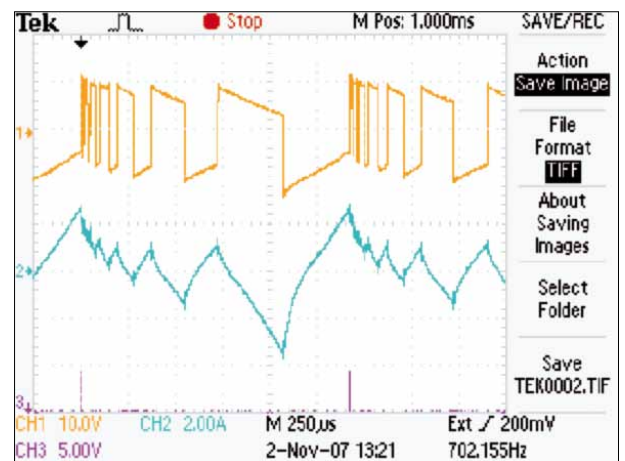
Obr. 1. Blokové schéma měřiče cívek

ho jádra. Při měření malým signálem se ale tato nelinearita neuplatňuje. Další nelineární a částečně nepředvídatelné změny parametrů cívek používaných v SMPS způsobují nesinusové průběhy obvodových veličin většiny SMPS. Zde je obvyklou praxí vypočítávat skutečné parametry pomocí Fourierovy transformace, tedy rozkladem nesinusových průběhů na harmonické složky.

V tomto článku představená metoda umožňuje přímou analýzu reálných průběhů napětí a proudů prvků SMPS, odpadá tedy náročná matematická konstrukce. Metoda vychází z dynamické definice vlastní indukčnosti cívky. Po příslušné úpravě lze říci, že indukčnost cívky je definována vztahem:

$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow L = u \frac{dt}{di}$$

V případě, že je obvod testován pro hodnoty di , dt a u blízké provozním stavům v obvodu SMPS, lze takto určenou indukč-



Obr. 2. Nově navržený průběh měřicího signálu (měřeno na testované cívkě)

zpracování výsledků a matematickému popisu naměřených dat je třeba pouze základní znalost matematiky a dostupnost vhodného softwaru pro zpracování dat. Tato kombinace umožňuje nové a efektivní měření s využitím základních fyzikálních zákonů.

Popis navrženého měřicího obvodu

Testovanou indukčnost připojíme na svorky přípravku. Na obr. 1 je testovaná cívka označena DUT (Device Under Test).

Přípravek je napájen ze stabilizovaného zdroje napětí. Tento zdroj umožňuje regulaci napětí, a tím i maximálního proudu cívky. Proud cívkou je spínán můstkovým spínačem. Řídícím obvodem tohoto spínače je jednočipový mikropočítač. Základní program umožňuje otestovat cívku několika standardními časovými průběhy proudu. Tyto průběhy jsou odvozeny od nejběžnějšího průběhu proudů v nejrozšířenějších typech měničů. Speciálním a inovativním průběhem je průběh na obr. 2, kde horní průběh (CH1) je napětí na měřené cívice a dolní průběh (CH2) je proud této cívky. Tento periodicky se opakující signál je složen z napěťových pulzů o proměnné šířce, čímž se dosahuje teoreticky lineárního průběhu proudu s měnící se vrcholovou hodnotou. Vzhledem k postupnému prodlužování pulzů vždy na dvojnásobek délky pulzu předchozího je možné proměřit chování cívky při různé délce pulzu (různém proudovém zatížení), a získat tak více informací o chování měřené cívky. Celá konstrukce přípravku počítá s využitím běžných laboratorních pomůcek, jako je regulovatelný stabilizovaný napájecí zdroj a digitální paměťový osciloskop. Výsledná data jsou analyzována jednoduchým analytickým softwarem.

V následujícím odstavci bude poskytnut návod na automatickou a manuální analýzu záznamu oscilogramu průběhu napětí a proudu cívky.

Vyhodnocení naměřených dat

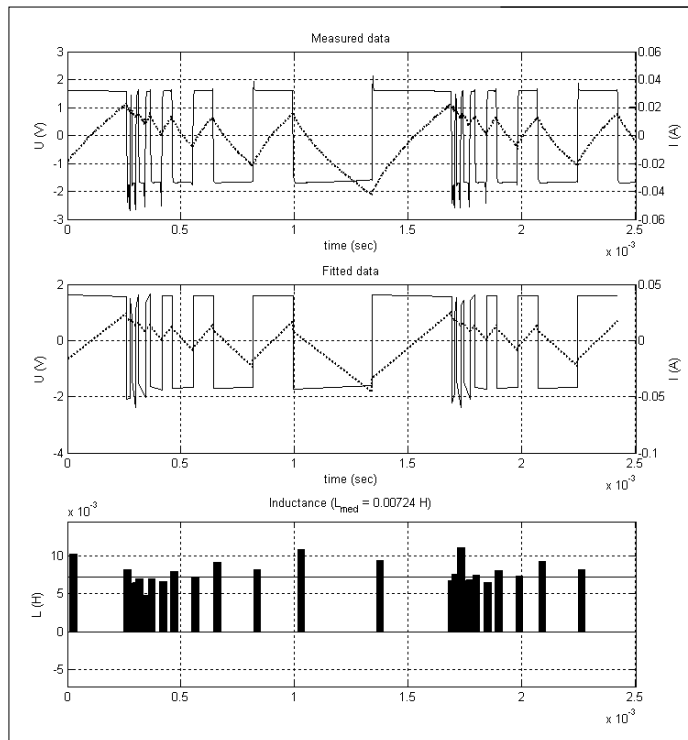
K záznamu dat je použit libovolný paměťový digitální osciloskop. Měřicí přípravek má pro snazší synchronizaci vyveden synchronizační signál. Tento signál je galvanicky oddělen od měřicího obvodu a má hodnotu slučitelnou se signály TTL. Výhodné je, pokud osciloskop umožňuje záznam v elektronické podobě, nejlépe jako seznam hodnot jednotlivých vzorků signálu s dostatečnou hustotou vzorkování.

Automatizovaná analýza

K vyhodnocení dat byl použit systém Matlab. Obdobně lze však využít jakýkoliv systém schopný operovat s naměřenými údaji – MS Excel, programovací jazyky: JAVA, C, C++ a další. Zaznamenaný průběh ve formě hodnot napětí a proudu v závislosti na čase je následně rozdělen na jednotlivé úseky, dělicím kritériem je průchod měřeného proudu nulou. Z každého úseku se odstraní prvních a posledních deset procent dat. Tím jsou odstraněny přechodné děje při změně stavu obvodu. Zbývající úsek je zpracován metodou nejmenších čtverců a proložen přímkou. Zde se vychází z předpokladu přibližně lineárního průběhu proudu v obvodu cívky v závislosti na čase v případě, že u cívky

nedošlo k přesycení jádra. Nelinearita průběhu způsobená sycením jádra je tak zvyrazněna a je možné ji na výsledném grafu lépe identifikovat. Tento postup je aplikován na všechny periody zaznamenaného signálu. Následně jsou hodnoty indukčnosti v každé periodě statisticky zpraco-

blíže než výpočty založené na indukčnosti změřené běžným, byť přesným RLC-metrem při frekvenci 1 kHz a signálu o amplitudě 1 V. Rozdíl ve výsledné indukčnosti se projeví především v případě, kdy provozujeme induktor na hranici, příp. i za hranici maximální povolené indukce (v katalo-

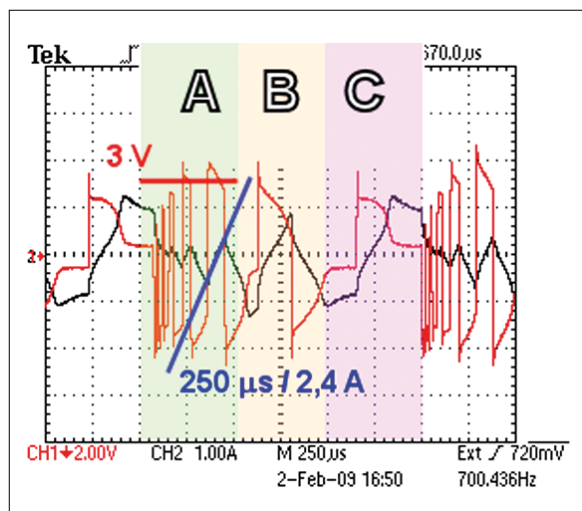


Obr. 3. Výstup programu pro vyhodnocení průběhů napětí a proudu měřenou cívkou

horní graf: naměřená data

prostřední graf: data upravená programem

dolní graf: hodnoty vypočtené indukčnosti pro jednotlivé periody měřicího signálu



Obr. 4. Příklady analýzy cívky
A – normální provoz, B – oblast saturace magnetického obvodu, C – omezení dodávaného proudu zdrojem, kanál CH1 – napětí na cívice, kanál CH2 – proud cívkou

vány a je vypočten medián. Tato hodnota je označována L_{med} a je považována za jeden z výsledků měřicí metody.

Takto získaný údaj v sobě nese informaci o vlivu velikosti proudového impulsu odpovídajícího běžnému pracovnímu stavu měniče na hodnotu indukčnosti. Návrhářské výpočty založené na této hodnotě jsou realitě

gu většinou označeno jako B_{max}). Takto „využitá“ cívka je velmi často provozována v jednodušších levných spínaných zdrojích. Důvodem je především úspora nákladů na komponenty zdrojů pro spotřební elektroniku. Popisovaná metoda měření tedy umožní přesnější návrh měničů i v této oblasti.

Graf na obr. 3 znázorňuje příklad výstupu automatického vyhodnocení parametrů toroidní cívky o indukčnosti L_{med} cca 7 mH.

Ruční analýza

Při ručním vyhodnocení dat je možné pohodlně získat především údaj o přesycení jádra cívky, tedy maximální

proud, kdy je ještě průběh proudu v čase lineární. Indukčnost je nutné určovat obdobně jako při automatickém vyhodnocení dat, tedy přímo z definice jako směrnici průběhu proudu cívkou v čase. Příklad určení indukčnosti je na obr. 4.

Sklon průběhu proudu je 2,4 A na 250 μ s, průměrné napětí na cívice je 3 V. Po úpravě

vzorce pro dynamickou definici indukčnosti dostáváme:

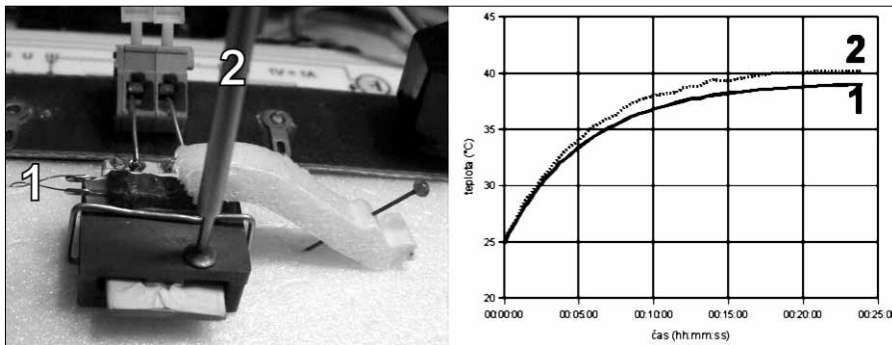
$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow L = u \frac{dt}{di} \Rightarrow L = 3 \frac{250 \cdot 10^{-6}}{2,4} \cong 312 \mu\text{H}$$

Tento jednoduchý způsob zjišťování indukčnosti může být vhodný v případě, že ne-

jsou provedeny koaxiálním kabelem, případně lépe – twistovaným párem vodičů se stíněním. Vstupní obvody teploměru by měly být vybaveny dolnofrekvenční propustí pro zamezení vlivu rušení od SMPS. Před započítím měření doporučuji vždy provést kontrolu vlivu elektromagnetického pole na teploměr. Nejjednodušší postup je sledování vlivu zapnutí a vypnutí měniče na měřený údaj. Také je vhodné sledovat stabilitu údaje teploměru při zapnutém měniči. Měřená teplota

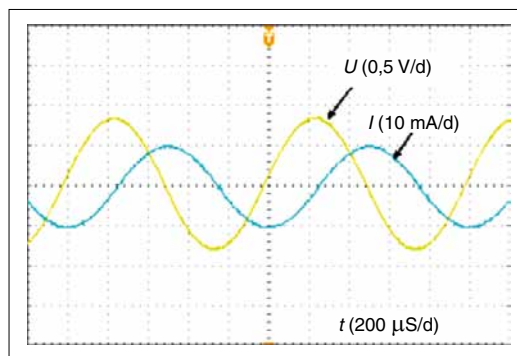
teploty pomocí odporového senzoru, realizovaného bifilárně vinutým tenkým měděným lakovaným vodičem. Vodič je navinut na papírovém nosiči a umístěn na tenkou korundovou podložku. Následně je senzor zalit epoxidovým lepidlem. Výhodou takto provedeného senzoru je dokonale rovná dosedací plocha korundové destičky, která má dobrý tepelný kontakt s magnetickým jádrem, a velmi nízká pořizovací cena. Příklad použití senzoru na testovaném planárním transformátoru je na obr. 5. V levé části obrázku je fotografie detailu umístění senzoru (1) a referenční termočlánekové sondy (2). V pravé části jsou výsledky naměřených hodnot při provozu testovaného transformátoru, získané oběma sondami. Údaje odporového senzoru jsou vypočteny ze známého vztahu teplotní závislosti kovového vodiče.

Funkce měření teploty jádra rozšiřuje možnosti popisovaného přístroje o možnost zjistit vliv změny teploty na vlastnosti cívek. Problematika teplotní závislosti konkrétních magnetik již přesahuje rozsah tohoto článku.



Obr. 5. Způsob měření teploty planárního transformátoru
1 odporové čidlo – bifilárně vinutý měděný lakovaný drát, 2 termočlánek

vlastní kvalitní RLC-metr. Daleko důležitější informací je údaj o počátku saturace jádra. Tento údaj se určí jako okamžik prudké (skokové) změny hodnoty směrnice proudu indukčnosti. Na uvedeném příkladu je mezní proud saturace přibližně 0,6 A. Údaj o proudu, při kterém přejde cívka s jádrem do saturace, je velmi užitečným a jinak v podstatě nezjistitelným údajem. V teoretické rovině lze údaj o saturaci daného jádra vypočítat. Je však třeba mít na zřeteli omezení plynoucí z velkého množství faktorů ovlivňujících tento údaj, a především požadavku na sinusový průběh veličin.



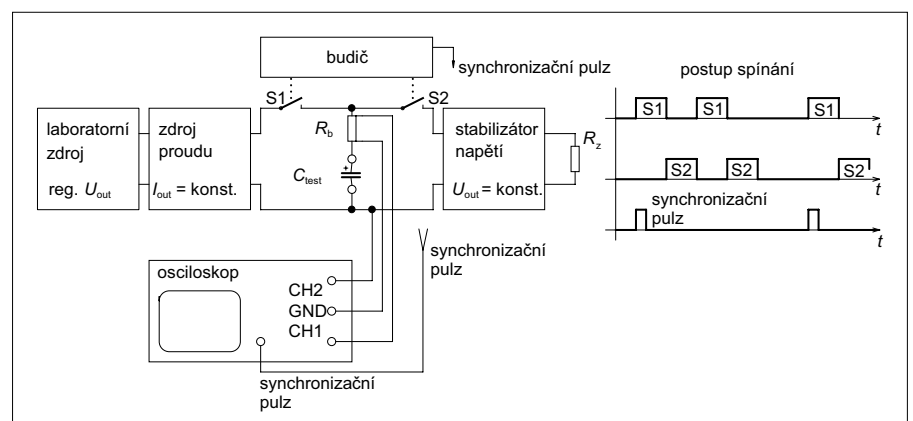
Obr. 6. Měření kondenzátoru 2,2 μF přístrojem MT 4080 – průběh napětí na kondenzátoru a proudu kondenzátorem

Schopnost určovat tuto hodnotu, navíc při podmínkách blízkých provoznímu stavu cívky, je hlavní předností představovaného měřiče indukčnosti.

Další možnosti zkoušek cívek

Vedle možnosti určit maximální proud tekoucí konkrétní tlumivkou lze pomocí navrženého přístroje testovat změny chování indukčnosti se změnou teploty. Zde je na místě zastavit se nejprve u samotného postupu měření teploty cívek pracujících v měniči. Senzory pro měření teploty lze rozdělit do kategorií dle mechanismu převodu teploty na elektrickou veličinu. Jako vhodné senzory pro toto měření se uplatňují především termočlánek, odporové senzory a polovodičové senzory založené na teplotní závislosti přechodu PN. Měření teploty uvnitř SMPS má svá specifika především z důvodu výskytu vysoké úrovně rušivých signálů.

Ideální senzor teploty je tedy dostatečně elektromagneticky odstíněn, přívodní vodiče



Obr. 7. Blokové schéma měřicího systému

nesmí prudce oscilovat, veškeré změny teploty jsou, už svou fyzikální podstatou, jevy spíše pomalé.

Při snaze navrhnout dle výše uvedených kritérií odpovídající teplotní senzor bylo velmi dobrých výsledků dosaženo při měření

Kondenzátory

Při měření kondenzátorů se dostáváme do podobné situace jako u indukčností, tedy většina měřicích přístrojů měří kapacitu kondenzátoru při nízkém napětí a jedné frekvenci. Například přístroj MT 4080A měří kapacitu napětím sinusového průběhu o amplitudě maximálně jeden volt. Příklad průběhu napětí a proudu při měření elektrolytického kondenzátoru 2,2 μF je na obr. 6.

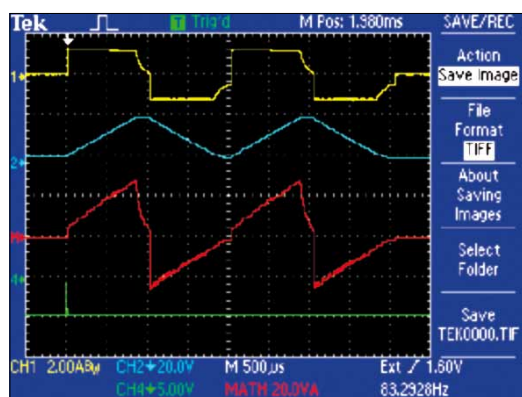
Chování elektrolytických kondenzátorů při střídavém pracovním napětí řádu jednotek voltů je ale odlišné od chování kondenzátoru namáhaného velkým stejnosměrným napětím s pulzním odběrem proudu nesinusového tvaru. Např. výpočet ztrát v kondenzátoru je popsán složitou rovnicí zahrnující

působení proudů rozdílných frekvencí, respektující hodnotu ekvivalentního sériového odporu (tento odpor je také funkcí frekvence) a větší množství materiálových konstant. Vzhledem k funkci kondenzátoru jako zásobárny energie není přesnost určení hodnoty

kapacity příliš kritická. Daleko větším problémem je určení ztrátového výkonu v kondenzátoru při namáhání proudem odebíraným spínaným zdrojem. Typické proudové namáhání kondenzátoru zapojeného ve stejnosměrném obvodu měniče je totiž superpozicí proudu odebíraného měničem a dobíjecího proudu kondenzátoru. Pro výpočet maximálního povoleného ztrátového výkonu jsou většinou využívány algoritmy založené na maximálním dovoleném oteplení kondenzátoru. Samotný výpočet proudu (v literatuře nejčastěji označován anglickým termínem *ripple current*) je pak většinou aproximací hodnot určených experimentálně výrobcem kondenzátoru. Tyto aproximace se u jednotlivých výrobců značně liší. Zde navrhovaná metoda měří přímo energii ztracenou v kondenzátoru, využívá se metody založené na porovnávání hodnoty energie dodané s energií vydanou.

Popis měřicí metody

Testovaný kondenzátor (na schématu – obr. 7 označen jako C_{test}) je připojen k měřicí-



Obr. 8. Měření vlastností kondenzátorů
kanál CH1: průběh proudu kondenzátorem
kanál CH2: napětí na kondenzátoru
kanál CH4: synchronizační pulz
kanál M: výsledek matematické operace $CH1 \times CH2$

mu přípravku pomocí dvou svorek. Přípravek představuje zdroj proudu spínaný tranzistorovým spínačem pro fázi nabíjení kondenzátoru. Vybíjení kondenzátoru je realizováno stabilizátorem napětí, který mění klesající napětí kondenzátoru na konstantní napětí na odporové zátěži, a tak zajišťuje vybíjení kondenzátoru konstantním proudem. Celý přípravek je řízen mikroprocesorem. Postupně se střídá fáze nabíjení a vybíjení testovaného kondenzátoru konstantním proudem. Mikroprocesor generuje také synchronizační pulz pro snadnou synchronizaci s osciloskopem.



Ing. Pavel Hrzina

vystudoval ČVUT, Fakultu elektrotechnickou, v Praze, kde od roku 2005 pracuje na katedře elektrotechnologie jako odborný asistent. Současně působí jako lektor fyziky, hardwaru a komunikace na Institutu informatiky. Jeho specializací jsou spínané zdroje, EMC, technologické aspekty konstrukce el. zařízení, programování jednočipových mikrořadičů a návrhy plošných spojů.

Vyhodnocení měření

Porovnávání kondenzátorů se v praxi realizuje jako srovnávací měření. Nastavením napájení proudového zdroje se nastaví maximální pracovní napětí kondenzátoru. Ovládací prvky přípravku se nastaví délka nabíjecího i vybíjecího impulsu. Řídicí procesor generuje posloupnost impulsů dle obr. 7. Připojený osciloskop spočítá střední hodnotu výkonu za jeden nabíjecí a vybíjecí cyklus. Metoda s výhodou využívá vlastností osciloskopu se schopností měřit veličinu označovanou jako *AVG* a například u osciloskopu Agilent 54621A definovanou dle následujícího vzorce:

$$AVG = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

kde *AVG* je výsledná střední hodnota, *n* je počet vzorků zkoumané části průběhu. Pokud je integrovanou veličinou průběh okamžitého výkonu (lze vypočítat jako součin průběhu napětí a proudu v obvodu kondenzátoru), je výstupem velikost ztrát v kondenzátoru. Vzhledem k charakteru měřených průběhů se ve své podstatě jedná o implementaci základního fyzikálního zákona – zákona zachování energie. Lze konstatovat, že takto získaná hodnota poměrně přesně reprezentuje velikost ztrát v kondenzátoru. Tato metoda je dostupnější než přímé měření ztrát v kalorimetru. Další předností je, že pracovní režim elektrolytického kondenzátoru s jednopolaritním napětím mnohem lépe odpovídá pracovním podmínkám než obvyklé měření střídavým napětím.

Vzhledem k nízké opakovací frekvenci generovaných impulsů je možné provádět měření i za podmínek překračujících dovolené trvalé zatížení kondenzátoru. Naměřená hodnota je totiž hodnotou za jeden cyklus, skutečný ztrátový výkon v kondenzátoru je třeba počítat dle vztahů pro přerušované zatížení. V případě, že chceme experimentálně vyhodnocovat zahřívání kondenzátoru vlivem střídavého proudu, musíme nastavit generátor impulsů na tvar blízký provoznímu stavu měniče.

vání kondenzátoru vlivem střídavého proudu, musíme nastavit generátor impulsů na tvar blízký provoznímu stavu měniče.

Vyhodnocování zahřívání kondenzátorů je jednodušší než v případě cívek. V okolí kondenzátoru nebývá většinou velká intenzita elektromagnetického pole a hliníkový obal je ve většině topologií spojen s nulovým potenciálem napájecího zdroje. Existují však i výjimky a je vždy třeba zajistit dokonalou elektrickou izolaci použitého senzoru. Dále je hliník dobrým vodičem tepla a zajistí tak rovnoměrné rozvedení tepla po celém povrchu kondenzátoru.

Typický průběh napětí a proudu v kondenzátoru připojeném na popisovaný měřič je znázorněn na obr. 8.

Závěr

Představované řešení umožňuje analýzu některých důležitých, ale méně kontrolovaných parametrů kondenzátorů a cívek. Tyto parametry však mají, bohužel, velmi výrazný vliv na životnost zařízení, jejich sledování je tedy více než žádoucí. Popisované zařízení vzniklo jako funkční vzorek na katedře elektrotechnologie ČVUT Fakulty elektrotechnické. Navrhované konstrukční řešení přípravků je pouze jedno z mnoha, důležité jsou ale podmínky, za kterých jsou data získávána. Právě rozmach vysokofrekvenčních SMPS v posledních desetiletích klade na parametry cívek a kondenzátorů úplně jiné požadavky než dříve.

Dalším důvodem, proč experimentálně kontrolovat např. výkonovou ztrátu v kondenzátoru, je značný rozptyl parametrů jednotlivých výrobců kondenzátorů. Právě navrhované měření umožní formou testu zajistit nejvhodnější poměr mezi cenou, tedy i kvalitou kondenzátoru, a jeho životností. Ze stejných důvodů jsou důležitá i měření a testy tlumivek a transformátorů. I v dnešní době dokonalých, ale složitých simulačních nástrojů je problematické postihnout vlivy parazitních parametrů na chování obvodu. Právě proto zde má místo i metoda čistě experimentální, tedy metoda popsána v tomto článku. ☒

This article discusses the measurement of parameters of coils and capacitors used in switching power supply (SMPS - Switch Mode Power Supply) small and medium power. To identify the basic physical parameters of passive components, such as resistance, inductance and capacity in engineering practice mostly used by digital RLC meters. This article is given an alternative way to identify these parameters. This method also allows for analysis of other properties of coils and capacitors.