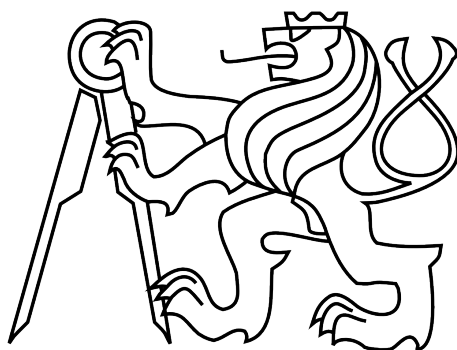


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie



Diplomová práce

**Planární transformátory pro statické měniče
používané v trakčních aplikacích**

Planar Transformers for Static Converters Used in Traction
Applications

Bc. Zuzana Konečná

Obor: Technologické systémy

Vedoucí práce: Ing. Petr Dobrovolný

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Zuzana Konečná**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Planární transformátory pro statické měniče používané v trakčních aplikacích**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem funkce a konstrukcí planárních transformátorů
2. Popište základní parametry planárních transformátorů pro statické měniče používané v trakčních aplikacích.
3. Navrhněte typové a kusové zkoušky planárních transformátorů pro statické měniče používaných v trakčních aplikacích.

Seznam odborné literatury:

- [1] FAKTOR, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN - technická literatura. Praha 2002.
[2] BIELA, J. Wirbelstromverluste in Wicklungen induktiver Bauelemente. Zürich. 2012.

Vedoucí: Ing. Petr Dobrovolný

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Použití díla v nekomerční vědecko-výzkumné a pedagogické činnosti bude vždy uvedeno úplnou citací bakalářské práce (s uvedením autora i vedoucího práce). Případné komerční využití bude vždy pro konkrétní případ předmětem jednání mezi autorem práce a zadávajícím pracovištěm (vedoucím práce) a může být uskutečněno jen se souhlasem obou stran. V případě použití komponent dovezených s osvobozením od plateb DPH a cla není komerční využití práce možné.

V Praze dne 6. května 2015

.....

Poděkování

Chtěla bych poděkovat mému vedoucímu Ing. Petru Dobrovolnému za rady udílené v průběhu vytváření této práce a firmě POLL, s.r.o. za umožnění realizace této práce. Můj dík patří zejména Ing. Jiřímu Semerádovi za konzultace k technickému a konstrukčnímu návrhu a realizaci planárního transformátoru. Za pomoc a podporu děkuji Ing. Pavlovi Žákovi, PhD. a Mgr. Lucii Šťastné.

Velký dík patří také mé rodině a přátelům za podporu.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na planární transformátor: jeho konstrukci, výhody oproti konvenčním transformátorům, princip funkce, použití. Ve firmě POLL, s.r.o. byl zkonstruován planární transformátor pro statický měnič, který je projektován pro použití v trakčních aplikacích. Statický měnič je napájen stejnosměrným napětím 600 V, které transformuje na hodnotu 28 V DC. Tato velikost napětí je využívána pro napájení palubní sítě vozidel a nabíjení trakčních baterií.

Součástí práce je rozbor, návrh a provedení typových a kusových zkoušek, které je nutné navrhnout a uskutečnit podle platných norem před předáním výrobku koncovému zákazníkovi.

Abstract

This thesis focuses on planar transformers, their construction, advantages over conventional transformers, functionality and usage. The planar transformer for a static converter was constructed in the POLL s.r.o. company. This transformer has been designed for traction applications. The static converter is supplied by 600 V DC and converts it to 28 V DC. This voltage is used for power supply of vehicles on-board networks and recharging traction batteries.

Part of this thesis also covers design verifications and routine verifications, which have to be designed and performed according to applicable standards, prior to delivery to the end customer.

Klíčová slova

Planární transformátor, trakce, statické měniče, typové zkoušky, kusové zkoušky.

Keywords

Planar transformer, traction, static converters, design verifications, routine verifications.

Seznam použitých zkratek a termínů

DPS	Deska plošných spojů.
Planární	Rovinný.
Skin efekt	Elektrický povrchový jev.
Proximity efekt	Jev blízkosti.
SMD	Surface Mounted Devices (součástky, které nepotřebují pro zapájení otvory na desce).
THT	Through-hole Technology (součástky s vývody, jež se osadí do otvorů v plošném spoji a zapájí).
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota).
EMC	Electromagnetic compatibility (elektromagnetická kompatibilita).
EMI	Electromagnetic interference (elektromagnetická interference – rušení).
EMS	Electromagnetic sensitivity (elektromagnetická susceptibilita – odolnost).
ZVS	Zero Voltage Switching (spínání prvku v nule napětí).
ZCS	Zero Current Switching (spínání prvku v nule proudu).

Obsah

1	Úvod	8
2	Planární transformátory	9
2.1	Princip funkce	9
2.2	Výhody planárních transformátorů	10
2.3	Konstrukce	11
2.4	Technologie	13
2.4.1	Technologie vinutí	13
2.4.2	Jádro planárního transformátoru	14
2.5	Návrh transformátoru	15
2.5.1	Skin efekt	15
2.5.2	Proximity efekt	20
2.5.3	Shrnutí nevýhod vyšších frekvencí	23
2.6	Výrobci — průzkum trhu	26
3	Planární transformátory — použití v trakčních aplikacích	28
3.1	Planární transformátor zkonstruovaný ve firmě POLL, s.r.o.	29
3.2	Zkoušky na elektrotechnických zařízeních	32
3.2.1	Typové zkoušky	33
3.2.2	Kusové zkoušky	35
3.3	Zkoušky celého produktu výkonového měniče	37
4	Zrealizované typové zkoušky	40
4.1	Parametry dané konstrukcí	40
4.2	Zkouška oteplení	40
4.3	Zkouška mechanické pevnosti – vibrační zkouška	43
4.4	Zkouška elektromagnetické kompatibility – EMC	46
5	Závěr	49
6	Seznam použité literatury	50
7	Seznam příloh	52

1 Úvod

Firma POLL, s.r.o. se zabývá vývojem a realizací výkonových měničů pro pohony a trakci. Hlavními zákazníky jsou ŠKODA ELECTRIC, a.s. a ŠKODA TRANSPORTATION, a.s. To znamená, že měniče, které se vyrobí ve firmě POLL, nalezneme v tramvajích, vlakových soupravách a popřípadě také v klimatizacích trolejbusů.

V tomto průmyslovém odvětví si většina aplikací žádá řešení na míru, a tedy v rámci každého projektu se vyvíjí nový měnič, který vyhovuje dané aplikaci. Aby se ověřila a prokázala jakost výrobku, je nutné po ukončení etapy vývoje provést na prvním sériově vyrobeném zařízení typové zkoušky, které požaduje příslušná norma. Případně další zkoušky, které byly dohodnuty mezi výrobcem a zákazníkem.

Pro ověření udržení jakosti výrobku se provádějí výrobní kusové zkoušky na každém zařízení. Rozsah zkoušek je opět dán normami, technickými specifikacemi, případně se jedná o zkoušky, které plynou ze zkušenosti výrobce.

Cílem této práce bylo seznámit se s aktuálním projektem firmy POLL, s.r.o., kterým byl statický výkonový měnič pro napájení palubní sítě vlakových souprav Deutsche Bahn Regio. Dále se zaměřit na dílčí část — planární transformátor, který je klíčovým komponentem statického měniče.

V první části práce je teoretické seznámení s planárním transformátorem, a to s principem funkce, konstrukcí a technologií.

Druhá část je zaměřena na samotné zkoušky zařízení. Firma mi umožnila podílet se na vývojových zkouškách planárního transformátoru i na některých typových zkouškách. Dále jsem navrhla výrobní kusové zkoušky. Podle zkušebního postupu pro kusové zkoušky se, v provozu během sériové výroby planárního transformátoru, budou jednotlivé kusy přezkušovat, aby se vyloučily z produkce neshodné kusy.

2 Planární transformátory

Důvod pro realizaci planárních prvků byl jednoduchý: bylo nutné vytvořit prvky, jejichž velikost a hmotnost by se podstatně zredukovala oproti klasickým konvenčním konstrukcím. Tyto prvky jsou především zamýšleny pro desky plošných spojů, popř. do aplikací, kde je důležitá redukce velikosti; tedy třeba skříně měničů.

Anglické „planar“ znamená rovinný, dvojrozměrný. Jsou to tedy obvodové prvky, které se vyznačují malou profilovou výškou. Řadí se mezi ně kondenzátory, odpory i vinuté prvky. Ty se potom používají nejčastěji, protože se dá výhodně využít jejich velkých provozních výkonů například ve spínaných zdrojích.

Poprvé se planární transformátory objevují již v osmdesátých letech 20. století. Jejich další progrese přišla v posledních dvou desetiletích s vylepšenou technologií, kdy se tyto výrobky díky nižší ceně staly konkurenceschopné.

2.1 Princip funkce

Hlavní myšlenka planárních transformátorů je založena na transformátorové rovnici:

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N_x \cdot \Phi \quad (1)$$

pro $x = 1,2$; kde U je indukované napětí do primárních nebo sekundárních závitů, f je provozní frekvence transformátoru, N je počet závitů primární nebo sekundární strany a Φ je magnetický tok. (Tvar rovnice pro sinusový průběh proudu.)

Pokud se zvýší provozní frekvence, je možné redukovat počet závitů transformátoru N_x , což platí jak pro primární, tak pro sekundární stranu transformátoru. To vše při zachování stejné hodnoty magnetické indukce B , respektive magnetického toku.

Planární transformátory jsou obecně provozovány na pracovních frekvencích v řádu stovek kHz až několik MHz, což vyžaduje zvláštní opatření týkající se elektromagnetické kompatibility (EMC). Při takto vysokých frekvencích vynikají parazitní jevy,

jako skin efekt a také proximity efekt, které poněkud relativizují výhodu tohoto designu.

Díky vysoké pracovní frekvenci je také nutné dobře navrhnout topologii spínacích prvků v měniči na primární i sekundární straně transformátoru. Při takto vysokých spínacích frekvencích dochází k velkým spínacím ztrátám, a proto se dbá na dodržení měkkého spínání — nejčastěji spínání v napěťové nule (ZVS) viz kapitola 3.

Vylepšit parazitní parametry planárního transformátoru lze několika způsoby, například přidáním planární tlumivky. Právě tato metoda byla využita ve firmě POLL, kde vyvinutý planární transformátor má v obvodu primárního vinutí včleněnou tlumivku, která při pracovní frekvenci 100 kHz zajišťuje spínání v napěťové nule, a tím zmenšení spínacích ztrát. Tlumivka je projektována na jmenovitý výkon transformátoru. Problém tedy nastává, pokud transformátor pracuje jen na zlomku jmenovitého výkonu, pak spínací ztráty rostou, protože spínací prvky nespínají přesně v nule.

2.2 Výhody planárních transformátorů

Výhody planárních transformátorů oproti klasickým [7]:

- Vysoká účinnost při vysokých provozních frekvencích
- Vynikající odvod tepla
- Nízká hmotnost
- Nízký profil
- Zvláště vysoká spolehlivost
- Výborná opakovatelnost výroby
- Nízká parazitní reaktance
- Vysoká výkonová hustota
- Snadná mechanická integrace

Planární transformátor je výhodné do zařízení navrhnout ve chvíli, kdy je nutný pro danou aplikaci vyšší proud nebo frekvence. S výhodou lze využít vysoké výrobní opakovatelnosti, protože podle jedné šablony se dá snadno vyrobit mnoho dalších kusů.

Velká výhoda planárních transformátorů je jejich snazší chlazení, což je dáno poměrem povrchu k objemu. Ten je podstatně větší než u konvenčních transformátorů, což má za následek lepší odvod tepla z objemu transformátoru a větší radiaci tohoto tepla. Tyto transformátory také mohou pracovat za vyšších pracovních teplot než klasické (v mezích normy).

Konstrukcí a užitými materiály je dáno, že planární transformátory jsou více než dvakrát lehčí než konvenčně užívané transformátory stejných výkonových tříd. Dále vynikají svojí vysokou účinností 97-99 %, což je dáno tím, že je možné konstrukcí dosáhnout malých ztrát jak ve vinutí, tak v jádře, čehož lze dosáhnout za předpokladu vysoké výkonové hustoty, vyšší než u konvenčních transformátorů, a výhodné vysoké proudové hustoty.

Planární transformátory mohou mít také speciální vlastnosti, jako je nízká rozptylová indukčnost a vysoký počet terminálů. Velmi důležitý je také vysoký výkon, až desítky kW.

2.3 Konstrukce

Planární transformátory jsou v průmyslových aplikacích k vidění ve dvou různých typových provedeních:

- Integrovaný na DPS – transformátor je přímo zabudován na desce plošného spoje, což lze výhodně využít v zařízeních, kde je nutné mít všechnu elektroniku na jedné DPS, případně tam, kde je prostě nedostatek místa. V tomto případě je transformátor konstruován ve vícevrstvé desce plošného spoje a v ní jsou vytvořeny otvory, kam se později vloží feritové jádro.
- Sestava samotného planárního transformátoru – výhodou tohoto provedení je,

že může být projektováno univerzálně a montováno do různých zařízení. Vinutí je oboustranně na DPS (eventuálně opět vícevrstvé DPS) prokládáno často jen izolačním papírem. Kontaktování jednotlivých desek se dělá buď pomocí prokovení, nebo kolíků (pinů), případně přes hranu DPS (transformátor menších výkonů).

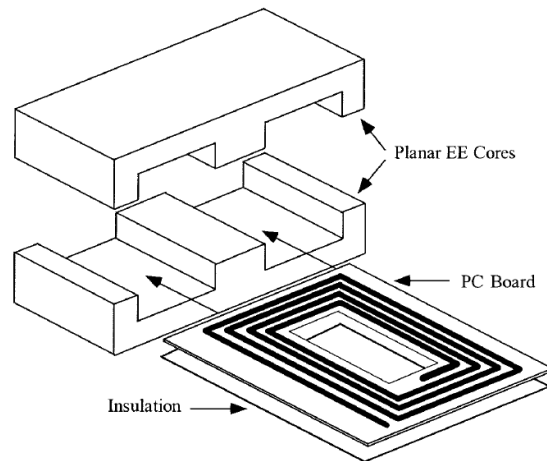
Speciálním případem je pak ještě planární transformátor bezjádrový — tedy vzduchový. Těto konstrukce lze využít, když není třeba posilovat magnetickou vazbu mezi primárním a sekundárním vinutím. Děje se tak zejména u závitů, jejichž tloušťka je velmi malá.

Model integrovaného planárního transformátoru je vhodný u transformátorů menších výkonů. Vodivé cesty jsou vytvořeny přímo na DPS. V tomto případě lze pak jednoduše konstruovat planární transformátory na vícevrstvých deskách plošných spojů, kde je vinutí v jednotlivých vrstvách zapouzdřeno. Deska je pak ještě vyříznuta pro umístění feritového jádra s nízkým profilem.

Standardním způsobem konstrukce samostatných planárních transformátorů je upevňování vinutí, tvořeného vyřezanými vodivými drahami z měděných plechů, na desky plošných spojů. Vinutí bývají z obou stran základní desky (DPS) a jsou potom od sebe oddělena izolačními distančními vložkami. Izolace může mít charakter izolačního papíru, případně například epoxidové hmoty, která lépe vyplní prostor mezi závitů.

Základním materiálem také nemusí nutně být DPS, minimálně v laboratorních podmínkách se experimentuje s nízkoteplotní technickou keramikou [5].

Mimo zmíněné konstrukce se objevují ještě konstrukce hybridní, tedy takové, ve kterých jsou planární transformátory přímo připojeny na DPS, ovšem konstruovány jsou zvlášť.

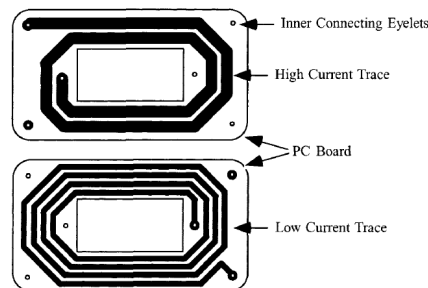


Obrázek 1: Typická konstrukce planárního transformátoru s EE jádrem. Vinutí na deskách plošných spojů [8].

2.4 Technologie

2.4.1 Technologie vinutí

Vinutí klasicky měděné může být i z jiného vodivého materiálu. Avšak pro planární transformátory vyšších výkonů bývá typické vinutí z měděných plechů tloušťky řádově desítek až stovek mikrometrů. Plechy bývají buď řezány – podle požadavku na kvalitu a přesnost řezu se může jednat např. o laser – nebo leptány do požadova-

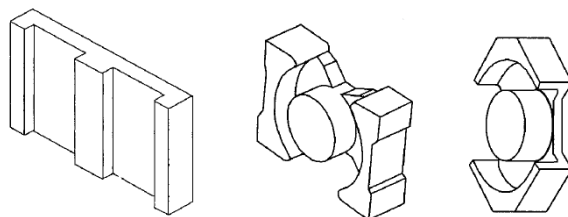


Obrázek 2: Typické vinutí na deskách plošných spojů, nahoře mohutnější sekundární vinutí pro stranu nižšího napětí a vyššího proudu. Dole potom primární vinutí, v obou případech jen jedna vrstva. Vrstvy se pak skládají na sebe a spojují prokovy – na jedné straně transformátoru primární a na druhé straně sekundární vinutí. Konstrukce pro E jádro [8].

ných tvarů. Pokud je požadována menší profilová výška vinutí (a zároveň provozní výkon transformátoru bude menší), pak se také setkáváme s vinutím, které je naprášeno či napařeno na základní desku, případně nanášeno tlustovrstvou technologií. Konkrétně u tlustovrstvé technologie jsme limitováni velikostí ok síta a viskozitou nanášené vodivé pasty. Za předpokladu, že by se udělal motiv vinutí příliš tenký, mohlo by dojít ke geometrické změně závitů či k mezizávitovým zkratům. Takovéto narušení geometrie závitů může nastat jak při samotném tisku, tak i při laminaci.

2.4.2 Jádru planárního transformátoru

Jak bylo výše uvedeno, ztrátový výkon je samozřejmě, stejně jako u konvenčních transformátorů, z části dán ztrátami v jádře. Nejčastěji jsou používána feritová jádra. Ta také limitují maximální provozní teplotu transformátoru na 120 °C.



Obrázek 3: Pohledy z perspektivy na konstrukce feritových jader planárních transformátorů: typická EE nebo EI konstrukce, Ferrite International PQ, Ferroxcube RM [8].

Alternativou k feritům jsou nanokrystalické slitiny, například VITROPERM [11]. Ve srovnání s ferity mají mnohem vyšší dynamický rozsah, vyšší sycení v kombinaci s nízkými hysterezními ztrátami (cca 35 mW/g ve srovnání s ferity: 80-180 mW/g). Jejich použití je tedy výhodné v aplikacích s velkým rozsahem frekvencí, například u měřicích transformátorů. Výhody VITROPERMu: menší hmotnost, menší objem, nižší ztráty. Tyto výhody jsou výraznější s rostoucím výkonem. Redukce hmotnosti je možná díky malé remanenci materiálu při vysokém nasycení (plochá hysterezní

smyčka). Při 100 °C mohou být feritová jádra sycena pouze do cca 0,25 T na rozdíl od VITROPERMu, ten až do 1 T.

2.5 Návrh transformátoru

Projektanti, kteří navrhují konvenční transformátory pracující na frekvenci 50Hz, musí samozřejmě počítat s výkonovými ztrátami transformátoru:

$$P = I^2 \cdot R_{DC} + P_{jadro}, \quad (2)$$

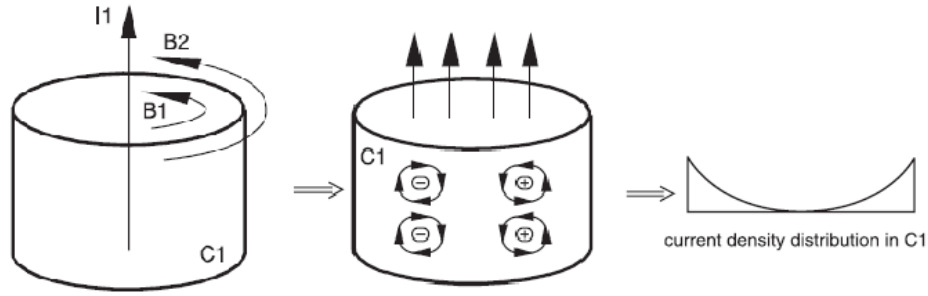
kde P jsou ztráty, I je proud transformátorem a R_{DC} resistance daná RMS proudem. Jedná se pouze o ztráty ve vinutí a ztráty v jádře.

Na druhou stranu při návrhu planárního transformátoru se musí počítat s parazitními jevy [3]. Vzhledem k vysokým pracovním frekvencím, na jakých planární transformátory pracují, nelze uvažovat pouze ztráty způsobené stejnosměrným ohmickým odporem. Střídavý proud indukuje střídavé magnetické pole, které vede ke vzniku vířivých proudů, a tedy i projevu ztrát vířivými proudy. Příčiny vzniku vířivých proudů jsou skin efekt (povrchový jev) a proximity efekt (jev blízkosti).

2.5.1 Skin efekt

Střídavý proud, který do vodiče teče, vytváří střídavé magnetické pole ve vodiči a jeho okolí. Magnetické pole ve vodiči pak indukuje elektrické pole, které způsobuje vznik vířivých proudů. Ty vedou k nerovnoměrnému rozdělení proudové hustoty v průřezu vinutí – uprostřed je proudová hustota menší, a naopak na okrajích vodičů je větší.

Zmenšením užitečného průřezu vodiče vzrůstají Jouleovy ztráty, vzniká teplo a narůstá odpor vodiče. Vlivem skin efektu je proudová hustota uprostřed vodiče velmi malá, tedy teoreticky bychom mohli vodič nahradit dutým vodičem, aniž by se výrazně zvětšil odpor. Konstrukčně by to v našich průřezích nebylo možné.



Obrázek 4: Grafické znázornění vzniku Skin efektu. Nejprve vznik vnitřního B_1 a vnějšího B_2 magnetického pole. Následně v druhé části obrázku vidíme indukování elektrického pole: + znamená, že siločáry vstupují do vodiče, - že vystupují. Tím je dán vznik vířivých proudů, které se podle směru buď sčítají na okrajích vodiče s proudem I_1 , nebo uprostřed odčítají. Proto je uprostřed vodiče malá hustota proudu (oproti jeho okrajům). [6]

Princip vzniku skin efektu je dobře vidět na obrázku 4, ale to samé lze také popsat díky Maxwellovým rovnicím. Magnetické pole vzniká vně a uvnitř vodiče, přičemž jeho velikost je v každém místě vodiče jiná:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \iint J d\vec{A}, \quad (3)$$

kde H je intenzita magnetického pole, l obvod vodiče, J proudová hustota vyvolávající magnetické pole ve vodiči o průřezu A .

Magnetická indukce B je úměrná intenzitě magnetického pole:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (4)$$

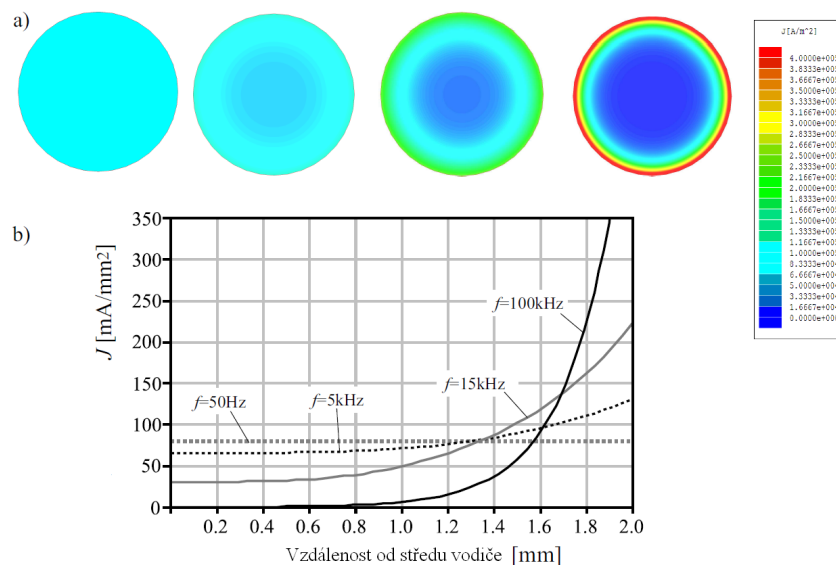
Faradayův zákon potom popisuje elektrické pole E indukované ve vodiči:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint B d\vec{A}, \quad (5)$$

kde E je intenzita elektrického pole a $\frac{d\Phi}{dt}$ časová derivace magnetického indukčního toku.

Poslední rovnicí – Ohmovým zákonem – dostaneme proudovou hustotu, která vzniká vlivem indukovaného elektrického pole:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (6)$$



Obrázek 5: a) Modelování rozložení proudové hustoty v kruhovém vodiči. Vodič namáhán stále stejným proudem o frekvencích: 50 Hz, 5 kHz, 15 kHz, 100 kHz. b) Velikost proudové hustoty J v závislosti na vzdálenosti od středu vodiče. [3]

Jak je vidět na obr. 5, míra uplatnění skin efektu je závislá na velikosti pracovní frekvence a jeho vliv do 20 kHz bývá zanedbatelný.



Obrázek 6: Rozložení proudové hustoty v jednom závitě planární cívky (stříbro, 20 kHz). [5]

Princip rozložení proudové hustoty vlivem skin efektu platí pro všechny tvary průřezů vodičů; na následujícím obrázku 6 je vidět důsledek skin efektu u závitě planární cívky.

Skin efekt, tedy jeho velikost pro danou frekvenci a materiál, lze vyjádřit pomocí hloubky vniku δ . Je to vzdálenost od povrchu vodiče, kde proudová hustota klesne na zlomek $1/e$ proudové hustoty na povrchu vodiče.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\mu\pi\sigma f}}, \quad (7)$$

kde δ je hloubka vniku, μ permeabilita, σ je elektrická vodivost materiálu a f frekvence proudu.

Frekvence f [MHz]	0,02	0,2	2	20
$\delta_{Ag}[\mu m]$	453	143	45	14,3
$\delta_{Cu}[\mu m]$	467	148	47	14,8
$\delta_{Au}[\mu m]$	526	166	53	16,6

Tabulka 1: Vypočítané velikosti hloubky vniku pro stříbrný, měděný a zlatý závit planární cívky [5].

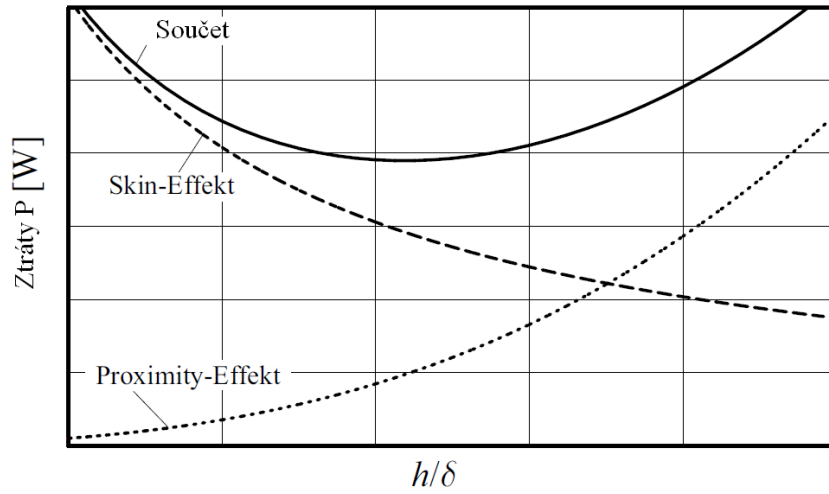
Jak je jasně patrné z tabulky 1, se zvětšující se pracovní frekvencí se zmenšuje hloubka vniku, a tedy užitná část průřezu závitů. Aby se tedy minimalizoval střídavý odpor R_{AC} , je žádoucí, aby poměr d/δ , tedy průměr vodiče ku hloubce vniku, byl minimální nejlépe menší nebo roven 2, respektive je žádoucí, aby hloubka vniku byla rovna nebo větší než průřez vodiče. Problémem však je, že skin efekt proudovou hustotu za vysoké frekvence vytlačuje čím dál víc od středu vodiče.

Naproti skin efektu však jde proximity efekt (viz kapitola 2.5.2 a obr. 7), a proto při výpočtu optimální výšky „h“ planárního typu vodiče užívaného v planárních transformátorech je nutné vzít v úvahu i ten. I za tohoto předpokladu je doporučovaný poměr h/δ roven nebo menší než 1 v závislosti na počtu vrstev vinutí [3].

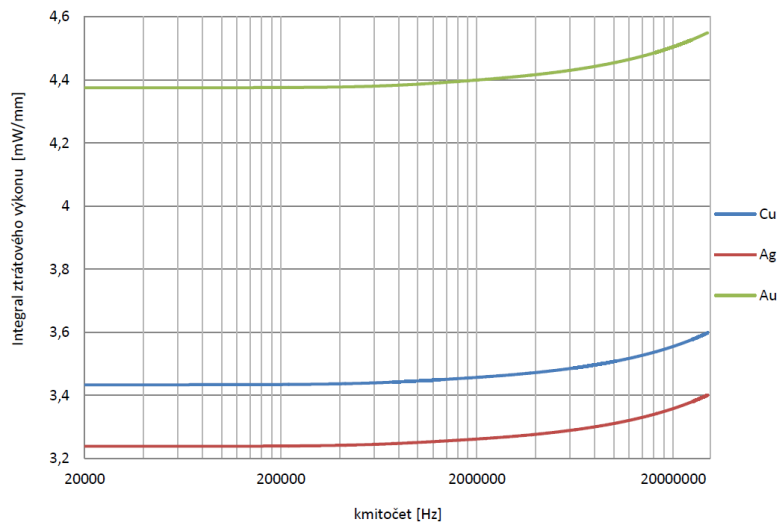
Mnohem lepší vypovídající hodnotu než hloubka vniku má ztrátový výkon způsobený skin efektem, který popisuje energii, která se přemění v teplo při průchodu proudu závitěm na vyšší frekvenci.

$$P_{Skin} = F(f)R_{DC}I^2, \quad (8)$$

kde P_{Skin} je ztrátový výkon, I velikost amplitudy proudu, který závitěm protéká, a R_{DC} stejnosměrná složka odporu závitů. $F(f)$ je potom skin efekt faktor, tedy vztah mezi střídavou a stejnosměrnou složkou odporu vodiče v závislosti na frekvenci. S rostoucí frekvencí se stejnosměrná složka nemění, ale střídavá vlivem skin efektu roste. S rostoucí frekvencí se zmenšuje velikost hloubky vniku δ , a proto se $F(f)$



Obrázek 7: Ztráty vlivem Skin efektu a proximity efektu. Tučně jejich součet v závislosti na poměru výšky vodiče planárního transformátoru ku hloubce vniku [3].



Obrázek 8: Ztrátový výkon planární cívky při skin efektu v závislosti na frekvenci. [5]

zvyšuje, jak je patrné na následující rovnici, která platí pro fóliový vodič užívaný v planárních transformátorech:

$$F(f) = \frac{x \sinh x + \sin x}{4 \cosh x - \cos x}, \quad (9)$$

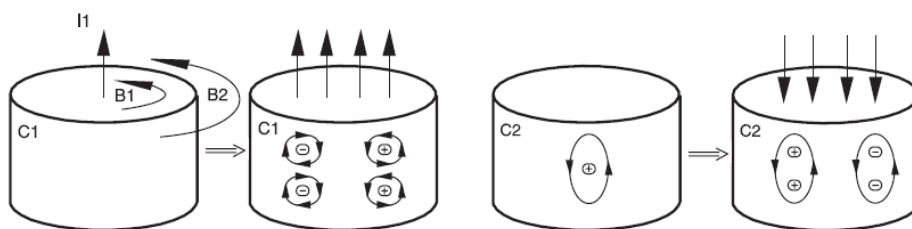
kde $x = \frac{h}{\delta}$. A h je výška fóliového vodiče.

Pokud tedy budeme uvažovat vodič konstantního průřezu, kterým stále protéká proud I o stejně velké hodnotě amplitudy, tak s rostoucí frekvencí také roste složka ztrátového výkonu daná skin efektem. Velikost P_{Skin} je také závislá na materiálu, z něhož je vodič vyroben. Pokud budeme uvažovat zlatý, měděný a stříbrný, tak největší P_{Skin} je u zlatého vodiče, menší u měděného a nejmenší v případě stříbrného vodiče [5]. Ilustrováno na průbězích obr. 8.

2.5.2 Proximity efekt

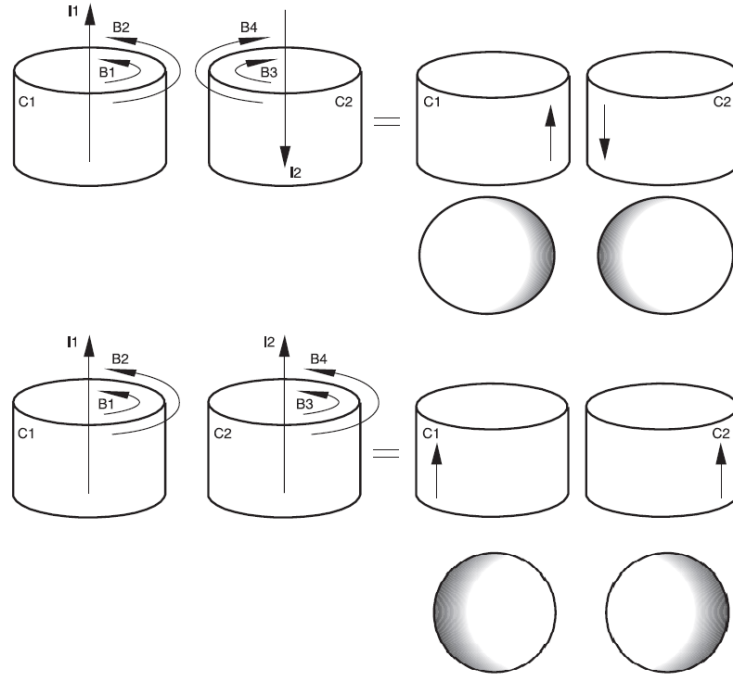
Druhým jevem, který se na vyšších frekvencích uplatňuje, je proximity efekt, česky také jev blízkosti. Opět zde dochází k vyvolání vířivých proudů vlivem střídavého magnetického pole, tentokrát sousedního vodiče (vodičů). Velikost vlivu proximity efektu je nepřímo úměrná vzdálenosti mezi sousedními vodiči.

Elektrické pole, které se indukuje vlivem proximity efektu, lze popsat pomocí rovnice Faradayova zákona (viz rce 5) podobně jako skin efekt. Rozdíl je v tom, že



Obrázek 9: Znázornění vzniku proximity efektu. Nejprve C1 působí na vodič C2, kterým neprotéká jeho vlastní proud a pouze se tam indukují vířivé proudy. Následně je C2 znázorněn i s ním protékajícím proudem I_2 , který má opačnou orientaci oproti I_1 . [6]

teď se jedná o vnější magnetické pole B_2 jednoho vodiče (C1, pokud se podíváme na obrázek 9), které působí na sousední vodič (C2).

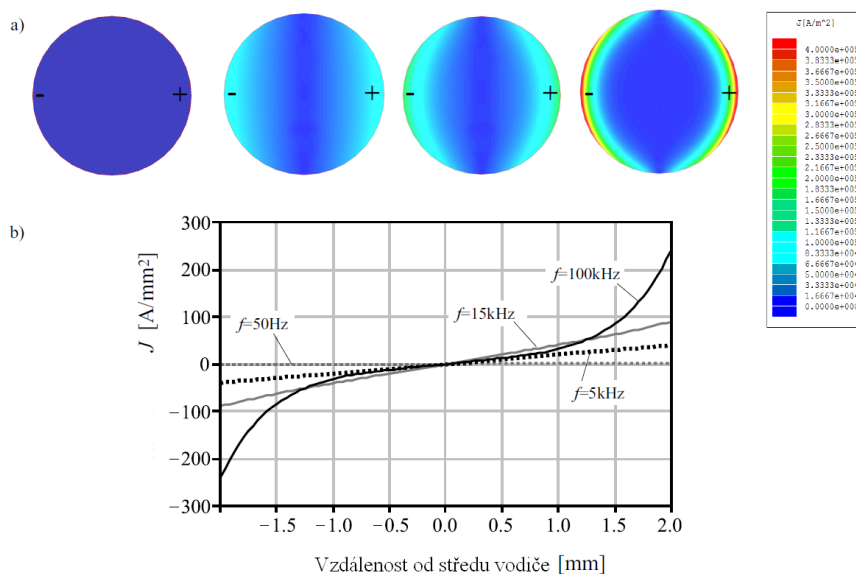


Obrázek 10: Znázornění vzniku proximity efektu na dvou sousedících vodičích. Nejprve s opačně orientovanými proudy a v druhé sekci s totožně orientovanými proudy. Na průřezech vodičů je šedě znázorněna zvýšená proudová hustota vlivem tohoto parazitního jevu. [6]

Na rozdíl od vířivých proudů, které jsou indukovány skin efektem, u proximity efektu nejsou středově souměrné podle středu vodiče. Magnetické pole je buzeno externím proudem sousedního vodiče. Rozložení proudové hustoty je tedy závislé na konstrukci a geometrii, v níž jsou uloženy sousední vodiče, v jaké jsou vzdálenosti od sebe a jakou orientaci má proud, který jimi protéká (viz obr. 10).

$$P_{Prox} = G(f)R_{DC}H_e^2 \quad (10)$$

je rovnice udávající velikost složky ztrátového výkonu daná proximity efektem. R_{DC} stejnosměrná složka odporu závitu, H_e je intenzita vnějšího střídavého magnetického pole a $G(f)$ je potom proximity efekt faktor. Ten vyjadřuje závislost ztrát na frek-



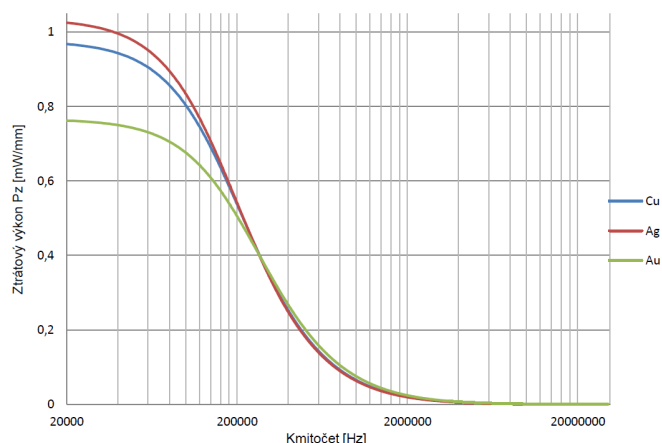
Obrázek 11: a) Modelování rozložení proudové hustoty v kruhovém vodiči ($r = 2$ mm). Vodič namáhán stále stejným proudem o frekvencích: 50 Hz, 5 kHz, 15 kHz, 100 kHz. Vzdálenost od sousedního vodiče $a = 5$ mm. b) Velikost proudové hustoty J v závislosti na vzdálenosti od středu vodiče. [3]

venci. Pro foliový vodič, jaký je používán u planárních transformátorů, lze součin $G(f)R_{DC}$ vyjádřit:

$$G(f)R_{DC} = \frac{l}{\delta\sigma} \frac{\sinh x - \sin x}{\cosh x + \cos x}, \quad (11)$$

kde l je šířka vodiče, σ elektrická vodivost, δ hloubka vniku, a $x = \frac{h}{\delta}$, kde h je výška vodiče.

Ztrátový výkon daný proximity efektem na rozdíl od skin efektu s rostoucí frekvencí klesá. Opět je jeho velikost závislá i na materiálu vodičů (viz rovnice 11) avšak pouze do frekvence cca 200 kHz. U nižších frekvencí byla složka P_{Prox} nejvyšší u stříbra, menší u mědi a nejmenší u zlata [5]. Patrné na grafu obr. 12.



Obrázek 12: Ztrátový výkon planární cívky při proximity efektu v závislosti na frekvenci. [5]

2.5.3 Shrnutí nevýhod vyšších frekvencí

Vzhledem k tomu, že střídavé ztráty mohou být až několikanásobné oproti stejnosměrným, v závislosti na výšce vinutí (vyšší vinutí znamená větší poměr $\frac{R_{AC}}{R_{DC}}$), tak je potřeba při návrhu planárních transformátorů řádně zohlednit parazitní jevy. Využívá se k tomu různých softwarových nástrojů pro modelování proudových hustot v průřezu vinutí a ke spočítání vlivu jednotlivých parazitních efektů. Oba jsou jak frekvenčně, tak i materiálově závislé, tedy pokud je planární transformátor konstruován pro konkrétní aplikaci, může se zohlednit výběr materiálu vinutí s přihlédnutím k pracovní frekvenci transformátoru.

Celkový ztrátový výkon u planárních transformátorů pak lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$P_{celk} = P_{jadra} + P_{DCztraty} + P_{ACztraty}, \quad (12)$$

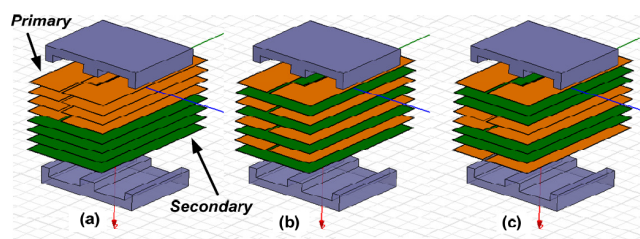
kde

$$P_{ACztraty} = P_{Skin} + P_{Prox} = R_{DC}[F(f)I^2 + G(f)H_e^2]. \quad (13)$$

Při konstrukci planárních transformátorů někteří výrobci, s přihlédnutím k uvedeným parazitním jevům, konstruují nejvnitřnější vrstvy s vinutími tenčí než ty vnější, protože ve vnitřních vrstvách dochází k řádově větším ztrátám.

Protože z obou zmíněných parazitních jevů je víc dominantní proximity efekt (v případě obvykle používaných pracovních frekvencí a rozměrů), při konstrukci planárních transformátorů se projektanti zaměřují hlavně na potlačení tohoto jevu. Snaha omezit vliv proximity efektu prokládáním sekundárních a primárních vrstev vinutí má také své hranice: narůstá totiž mezizávitová kapacita.

Pokud se podíváme na obr. 13, vidíme několik možností řešení. Variantu a), neprokládání primárních vrstev vinutí sekundárními, výrobci neupřednostňují. Právě při této konstrukci má totiž proximity efekt největší vliv. Pokud se tedy přejde k prokládání vrstev, je na výběr mnoho kombinací, například obr. 13 b) a c). V prvním případě má pravidelné prokládání za následek největší potlačení proximity efektu, ale oproti druhé variantě je podstatně větší složka právě parazitní kapacity (angl. Stray capacitance).



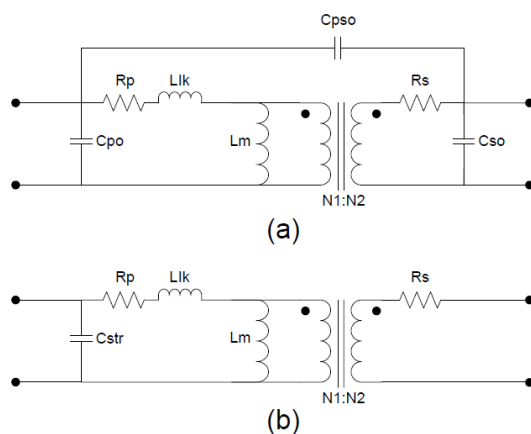
Obrázek 13: 3D model vrstev vinutí planárního transformátoru. a) neprokládané, b) prokládané P-S-P-S, c) prokládané P-P-S-S [9].

Výpočet parazitní kapacity je dán vztahy:

$$\begin{aligned}
 C_{str} &\approx C_p + C_s \\
 C_p &= C_{po} + (1 - k) \cdot C_{pso} \\
 C_p &= k^2 \cdot C_{so} + k(k - 1) \cdot C_{pso},
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

kde k je poměr závitů. Snaha je, aby vzájemná kapacita mezi primárním a sekundárním vinutím C_{pso} byla co nejmenší. Pak je možné dosáhnout při EMI (elektromagnetická interference) dobrých výsledků [9]. Parametry na schematickém obrázku 14.

Poslední jev, který je nutné při vývoji planárního transformátoru zohlednit, je svodová indukčnost (anglicky Leakage inductance).



Obrázek 14: Náhradní schéma kapacit transformátoru: a) s vlastní kapacitou primárního vinutí C_{po} , sekundárního C_{so} a vzájemnou C_{ps0} ; b) s náhradní ekvivalentní parazitní kapacitou přepočítanou na primární stranu [9].

Ne všechny magnetický tok generovaný primární stranou transformátoru je přenesen přes magnetický obvod na sekundární stranu. Část toku uniká z jádra a mizí v okolí, ve vrstvách vinutí a izolátorech mezi vrstvami [9].

Výpočet této parazitní indukčnosti je dán vztahem:

$$L_{lk} = \mu_0 \cdot \frac{l_w}{b_w} \cdot 4 \cdot \left(\frac{h_1 + h_2}{3} + h_{\Delta} \right), \quad (15)$$

kde l_w je délka každého závitů, b_w je jeho šířka, h_1 a h_2 představuje tloušťku primární a sekundární vrstvy vinutí a h_{Δ} je výška izolační vrstvy. Parazitní indukčnost je znázorněna na schematickém obrázku 14.

Správné navržení planárního transformátoru v sobě zahrnuje analýzu parazitních jevů a modelování transformátoru právě z tohoto hlediska. Nelze totiž jako u konvenčních transformátorů při ladění pouze uvažovat počet závitů na primární a sekundární straně — tedy podle potřeby upravit počet závitů. Při návrhu planárních transformátorů, vzhledem k nízkému celkovému počtu závitů, není možné počet měnit, protože pak by došlo k výrazné změně transformačního poměru.

2.6 Výrobci — průzkum trhu

Na webových stránkách firem zabývajících se planárními vinutými prvky je možné v katalogových listech nalézt parametry jednotlivých výrobků. Pro výkonové planární transformátory mezi ně samozřejmě patří výkon, vstupní napětí, výstupní proud, uvedené parametry potom často pro několik příkladů pracovní frekvence v rozsahu daného výrobku. V některých případech lze najít parametry k výrobku také pro případ, že se transformátor použije jako planární induktor. Dále bývají uvedeny vhodné topologie pro zapojení daného transformátoru. Klasicky to je plný můstek (Full Bridge), poloviční (Half Bridge), rezonanční měnič, Flyback apod.

Payton planar Tato izraelská firma je předním výrobcem planárních transformátorů v celosvětovém měřítku. Jejich výrobky zabírají celou škálu planárních transformátorů jak do frekvence, tak i jmenovitého výkonu. Planární transformátory této firmy nalezneme ve většině výkonových měničů pro trakční účely [12].

I u nás ve firmě POLL se používají transformátory této značky pro dobré parametry a jistou kvalitu (v příloze je datashheet jednoho z využívaných výrobků). Firma Payton má mnohaletou tradici a výrobky prověřené praxí.

Pulse Electronics Corporation Firma má v nabídce planární transformátory až do výkonů 500 W [13]. Transformátory tedy nemají dostatečný jmenovitý výkon pro aplikace v trakčním průmyslu.

V oblasti výkonových planárních transformátorů u nich probíhá aktivní výzkum.

V nabídce však mají zejména planární indukčnosti pro vesmírný průmysl a armádu.

Standex-Meder Electronics Jejich produkty našly uplatnění v leteckém průmyslu a vojenství. Planární transformátory, které mají v nabídce, zahrnují transformátory o jmenovitém výkonu až 10 kW. Nedosahují však požadovaných vstupních napětí [14].

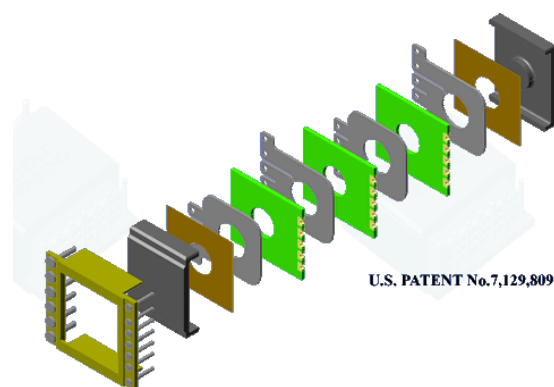
Himag Planar V nabídce produktů se nacházejí transformátory o výkonech až 50 kW a vstupním napětím do 1000 V, výstupním proudem až 250 A [15]. To jsou parametry vyhovující použití v trakčních aplikacích. Uvádějí, že jejich výrobky

jsou využity v mnoha průmyslových odvětvích: vysokofrekvenční nabíječky, hybridní vozidla, měniče...

Premo Premo Planar Transformers nabízí velký sortiment výrobků, přičemž kombinuje 16 typů transformátorových jader, 8 druhů izolačních systémů a samozřejmě všechny tři druhy konstrukcí. V jejich nabídce jsou ovšem spíše transformátory malých výkonů. Nejvýkonnější planární transformátor má jmenovitý výkon 4,8 kW.

Jejich výrobky mají největší uplatnění v AC/DC spínacích zdrojích [16].

Coilcraft Tato velká společnost, která má sídlo na třech kontinentech, má velkou paletu produktů, kterou nabízí. Ovšem pokud se zaměříme na planární transformátory, tak žádný z nich se nedá v naší konkrétní aplikaci použít, protože nepřesahují ani hranici 500 W jmenovitého výkonu [17].



Obrázek 15: Model planárního transformátoru firmy Planar Quality Corporation [18].

Planar Quality Corporation Americká firma, která stála u počátku planárních transformátorů, protože začala v této branži působit v roce 1986, má na svém kontě také řadu patentů.

Část výroby má firma v jižní Floridě a ty nejvýkonnější transformátory potom vyrábí v Asii. Dle toho, co se na jejich internetových stránkách uvádí, nabízejí planární transformátory právě i pro statické DC/DC měniče (jmenovité výkony až 30 kW) [18].

3 Planární transformátory — použití v trakčních aplikacích

Díky parametrům planárních transformátorů jsou tato zařízení široce využívána v trakčních aplikacích, a to nejen v měničích (touto aplikací se zabývá tato práce), ale také obecně v napájecích zdrojích či v řídicí elektronice.

V dnešní době se již upustilo od rotačních měničů pro jejich relativně nízkou účinnost a velkou prostorovou náročnost. V trakčních aplikacích se dnes používají výlučně statické měniče – jsou účinnější, a navíc postrádají problematické rotující ústrojí s komutátory.

V trakčních aplikacích ve statických měničích je kladen obecně velký důraz na vysokou účinnost, vysokou integraci v malém objemu měniče, spolehlivost a nízkou úroveň EMI (elektromagnetická interference – rušení). A právě rozměrový požadavek byl impulsem pro nasazení planárních transformátorů pro tyto aplikace.

Podmínkou splnění trendu vysoké integrace je vysoká spínací frekvence měniče v řádu stovek kHz. Čím vyšší je spínací frekvence, tím menší jsou rozměry vinutých dílů, magnetik a kondenzátorů. Zároveň ale při vysoké frekvenci spínání začínají být dominantní spínací a vypínací ztráty polovodičových prvků, což vede při standardním způsobu spínání prvků (tvrdé spínání), k poklesu účinnosti měniče a k velkým nárokům na chlazení.

Z toho důvodu se přešlo k technice měkkého spínání, a to spínání polovodičových prvků v nule napětí (ZVS – Zero Voltage Switching), nebo spínání prvku v nule proudu (ZCS – Zero Current Switching). Existují i zapojení, která obě tyto metody kombinují.

Právě metodou měkkého spínání dochází k značné redukci nejen spínacích ztrát, ale také EMI.

V měničích se používají dva typy výkonových tranzistorů: MOSFET a IGBT. IGBT je možné použít maximálně do spínací frekvence 100 kHz. Tedy pouze do této pracovní frekvence lze využít jeho menšího ztrátového výkonu v sepnutém stavu – to je výhoda IGBT oproti MOSFET. Typicky se však používá MOSFETů, měkkého spínání typu ZVS a topologii plného můstku v různých modifikacích. Jak bylo uvedeno výše (2.6), výrobci s touto topologií při navrhování planárních transformátorů

a v příkladech použití výrobků v katalogových listech počítají.

Měniče využívající měkké spínání se dále dělí na rezonanční a kvazirezonanční měniče. Rezonanční měniče využívají sériový nebo paralelní rezonanční LCC obvod, průběhy napětí nebo proudu jsou harmonické. Řízení a návrh těchto měničů je poměrně složitý, měniče se řídí změnou spínací frekvence v závislosti na velikosti zátěže. Topologie měniče není omezena pouze na plný můstek, ale přidáním rezonančního obvodu v podstatě do jakékoliv topologie a úpravou řízení lze dosáhnout měkkého spínání. Nevýhodou u části topologií je velikost maximální hodnoty napětí na polovodičových prvcích, která může být i několikrát vyšší než je úroveň amplitudy vstupního napětí. Z tohoto důvodů je nasazení do aplikací s vysokým vstupním napětím nevhodné.

Kvazirezonanční měniče využívají pomocný rezonanční obvod, ale průběhy napětí nebo proudu nejsou plně harmonické. Měkkého spínání se dosahuje detekcí minimální úrovně napětí na spínacím prvku v době, kdy se akumulovaná energie transformuje do zátěže. Tato topologie má vysokou účinnost a nízkou úroveň EMI.

U výrobců statických měničů o výkonech v řádu jednotek až desítek kW se staly populární díky jednoduššímu řízení a návrhu, topologie ZVS plný můstek:

- se sériovou tlumivkou,
- s paralelní tlumivkou,
- s pomocným LCC obvodem,
- s LCC obvodem a synchronním usměrňovačem na výstupu.

3.1 Planární transformátor zkonstruovaný ve firmě POLL, s.r.o.

Na obrázku 16 je vidět prototyp planárního transformátoru. Celá sestava obsahuje jak samotný transformátor, tak planární tlumivku upevněnou na horní straně. Tlumivka je zapojena v půlce primárního vinutí a slouží k vyladění spínání ZVS,

tedy aby docházelo k minimálním spínacím ztrátám. Na primární straně transformátoru je pak feritový kroužek, který zabraňuje šíření rušivých signálů do sítě 570 V. Sekundární strana je připojena k pasovině, která dál vede do nízkonapěťové části měniče na usměrňovač.



Obrázek 16: Prototyp planárního transformátoru navrhnutý a zkonstruovaný ve firmě POLL, s.r.o.

Transformátor je konstruován tak, že na obou stranách nosné DPS je vinutí z 400 μm tlustých vrstev mědi. K výrobě bylo použito klasické technologie DPS a vinutí bylo pro dosažení požadovaného tvaru závitů podle šablony leptáno. Pokud by se složilo vinutí k sobě, tak by vznikly velké vzduchové mezery, proto pokud mezi vinutími není DPS, pak je tam Neoflex, tedy epoxid se skelnou tkaninou, který vinutí izoluje. Transformátor stejně jako tlumivku kryje krycí hmota, zabraňující vniku prachu, nečistot a vlhkosti dovnitř. Planární transformátor má feritové jádro.

Z technických podmínek statického měniče plynou technické parametry planárního transformátoru. Viz. tabulka 3 a 2.

Na obrázku 17 je potom schematicky znázorněno zapojení planárního transformátoru do projektovaného DC/DC měniče. Konkrétně se jedná o nabíječ určený k napájení sítě 24 V DC na vozidle a zároveň jako nabíječ palubních baterií stabilizovaným napětím 24 V DC (regulovatelně až 30 V DC) a proudem až 240 A. Nabíječ bude napájen z měniče pro pomocné pohony napětím 670 V DC.

Nabíječ pracuje na principu kvazirezonančního ZVS spínaného zdroje s pevnou

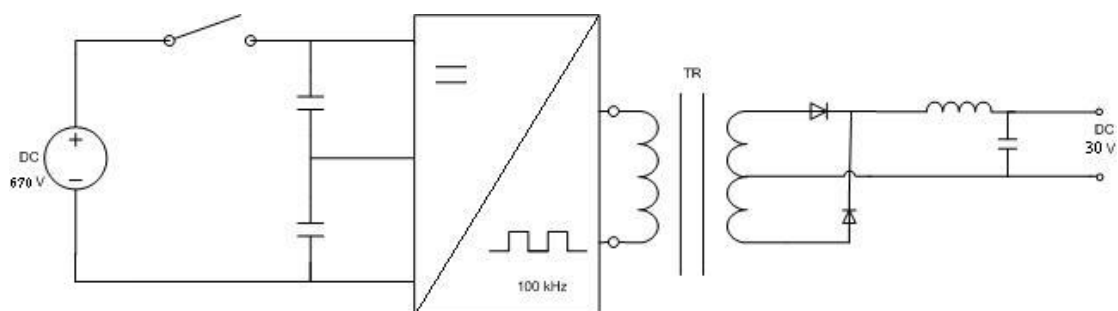
Galvanické oddělení	Parametry
Vstup/výstup	4000 V AC 50 Hz 1 min
Vstup/kostra	2500 V AC 50 Hz 1 min
Výstup/kostra	750 V AC 50 Hz 1 min

Tabulka 2: Galvanické oddělení planárního transformátoru zkonstruovaného ve firmě POLL, s.r.o. Prověřuje se dielektrickou zkouškou (viz Kusové zkoušky kapitola 3.2.2).

Popis	Značení	Hodnota
Rozsah pracovních teplot	ϑ_p	-35 °C až +70 °C
Jmenovitá pracovní frekvence	f_N	100 kHz
Jmenovité vstupní napětí	U_{IN_N}	400 V
Maximální výstupní napětí při jmenovitém proudu	$U_{OUT_{MAX}}$	30 V
Výstupní proud jmenovitý (trvalý)	$I_{OUT_{MAX}}$	240 A

Tabulka 3: Technické parametry planárního transformátoru zkonstruovaného ve firmě POLL, s.r.o.

pracovní frekvencí 100 kHz. Sestává se ze vstupního EMC filtru, vstupních ochran, výkonových tranzistorů na vysokonapěťové straně, planárního transformátoru, výstupního diodového usměrňovače na nízkonapěťové straně a výstupního vyhlazovacího LC filtru. Nabíječ samozřejmě obsahuje i řídicí elektroniku, která je napájena



Obrázek 17: Schematické zapojení planárního transformátoru ve statickém kvazirezonančním měniči vyrobeném firmou POLL, s.r.o.

ze vstupu 670 V DC a zároveň z externího zdroje 24 V DC.

3.2 Zkoušky na elektrotechnických zařízeních

Každé vyvinuté elektrotechnické zařízení je nutné vyzkoušet, tedy ověřit jeho funkci a bezpečnost. Pro každý druh elektrotechnického zařízení je vydána norma, která definuje provozní podmínky, názvosloví, charakteristiky a zkušební metody. Vzhledem k tomu, že v našem případě se jedná o výkonový transformátor, musíme se řídit při navrhování zkoušek Českou technickou normou ČSN EN 61558-1: Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků – Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky [2]. Tato norma je českou verzí evropské normy EN 61558-1:2005.

Existují tři kategorie zkoušek:

- Vývojové zkoušky
- Typové zkoušky
- Výrobní kusové zkoušky

Zákazník spolu s dodavatelem ve fázi nabídky dojednájí technické podmínky, které musí zařízení splňovat. V technických podmínkách jsou definovány typové a kusové zkoušky včetně příslušných použitých norem. Dodavatel pak podle směrnic firmy sestaví plán zkoušek zahrnující celý seznam zkoušek a specifikace zkoušek.

Vývojové zkoušky slouží vývojové sekci firmy pro ověřování sledovaných parametrů výrobku. Zpravidla se tedy v jednotlivých vývojových etapách sledují vstupní a výstupní napětí a proudy, případně parametry meziobvodu, výkon zařízení a teplota. V případě zařízení nevyhovujícího technickým specifikacím jsou nutné další vývojové úpravy.

Ve chvíli, kdy je ukončena vývojová etapa, následuje vlastní výroba sériových kusů podle dokumentace. Ty potom musí vyhovět typovým zkouškám dle norem a specifikací uvedených v technických podmínkách mezi zákazníkem a výrobcem. Následně

je možné daný typ výrobku expedovat. V případě elektrotechnických zařízení takovýchto parametrů se standardně dělají výrobní kusové zkoušky na každém expedovaném zařízení (v případě malých součástí se může jednat pouze o namátkovou kontrolu náhodně vybraných kusů dané výrobní série). Během typových a výrobních kusových zkoušek nesmí dojít k nesprávné funkci zařízení nebo ke stavu, kdy funkční charakteristika neodpovídá specifikaci.

Typové a kusové zkoušky se provádí podle firemní metodiky. Tím se zajišťuje dobrý standard a jakost výrobků a také to, aby byly zkoušky opakovatelné, tedy aby bylo specifikováno za jakých podmínek probíhaly. Během zkoušky musí vedoucí technik vést pracovní záznam zkoušky, ze kterého se následně vytvoří protokol o zkoušce.

Ve firmě POLL, s.r.o. se požadované zkoušky navrhují dle interní metodiky [10].

3.2.1 Typové zkoušky

Typové zkoušky se neprovádí pro každý vyrobený kus, ale pouze pro první výrobky daného typu. Tyto výrobky musí být již sériově vyrobené a typové zkoušky musí prověřit vývojovou fázi, tedy že daný typ výrobku splňuje stanovené parametry. V případě, že se provede modifikace – vývojová úprava výrobku –, je nutné opakovat zkoušku.

Na základě dohody mezi výrobcem a zákazníkem je možné, při výrobě velkého počtu výrobků, provádět opakované kontrolní typové zkoušky tedy potvrzení o udržení jakosti výrobku.

Postup typového zkoušení zařízení je rozdělen do následujících etap:

- Výběr typových zkoušek

V této etapě se prostudují normy, které odpovídají danému výrobku, a spolu s projektovou dokumentací tvoří základ pro výběr a návrh typových zkoušek.

- Plánování typových zkoušek

Ne vždy je možné všechny typové zkoušky provést přímo v podniku. Například pro klimatické zkoušky nemá každá firma potřebná zařízení, protože ne každá klimatická pec zvládne celý rozsah pracovních teplot a vlhkostí. Další náročnější

zkouškou je elektromagnetická kompatibilita. Místem, kde se nejčastěji zkoušky provádí, je elektrotechnický zkušební ústav, kde jsou certifikované laboratoře. Právě pro náročnost koordinace jednotlivých zkoušek a případné zamluvení laboratoří je žádoucí správné naplánování zkoušek.

- Příprava typových zkoušek

Příprava prostor – tedy buď specializovaných zkušeben, případně, pokud zkouška probíhá v prostorách firmy (což je současný trend), je nutné vymezit a upravit zkušební prostor, aby byl dostatečný a bezpečný. Na zkušebně musí být bezpečnostní vypínací tlačítko, prostorem nesmí procházet nepovolané osoby apod. Dále je nutné připravit náležitosti pro danou zkoušku. Může se jednat o klimatické boxy, když je to pro danou zkoušku vyžadováno, dále o zátěže – ty musí odpovídat provozní realitě zařízení – a napájecí zdroje, které splňují potřebné parametry a dodávají maximální výkon zkoušenému zařízení. Posledními zařízeními jsou měřící přístroje: osciloskopy, multimetry atd.

V případě našeho statického měniče pro trakci zastupuje během zkoušek baterii na voze laboratorní zdroj stejnosměrného napětí.

Po přípravě prostor, zkušebních a měřících přístrojů se zařízení zapojí dle zkušebního postupu.

- Realizace typových zkoušek

Vlastní realizace musí být prováděna s výhradně kalibrovanými měřícími přístroji. Zároveň musí být průběh zaznamenáván do pracovního záznamu.

- Výsledky typových zkoušek

Výstupem typových zkoušek je protokol o zkoušce, kde nesmí chybět údaj o tom, kdo zkoušku prováděl, jaká byla teplota okolí a samozřejmě naměřená data, vypočítaná data a případně průběhy vynesené do grafů. Dílčí výstupy se liší v závislosti na proběhnuté zkoušce, nicméně na konci každého protokolu nesmí chybět závěr a vyhodnocení zkoušky – tedy zda výrobek vyhověl, či nikoliv. Vyhodnocení proběhne dle kritérií přijatelnosti zkoušky.

Z normy ČSN EN 61558-1 [2] vyplývá, že je možné planární transformátor zkoušet za podmínek, které existují v spotřebiči či zařízení, pro který je určen. Vzhledem

k tomu, že na nově vyvinutém statickém měniči se musí provést také typové zkoušky, byly v souladu s normou realizovány pouze jedny zkoušky, společné pro celé zařízení.

Na základě toho musí transformátor vyhovět, případně musí být zajištěna:

Zkouška	Podrobnosti
Ověření rozměrů a tolerancí	4.1
Vážení	4.1
Povrchové cesty, vzdušné vzdálenosti a vzdálenosti napříč izolací	4.1
Zkouška oteplení	4.2
Ochrana před zkratem a přetížením	Zajišťuje nadřazená elektronika měniče, provádí se zkouška odolnosti proti zkratu celého měniče – typová i kusová zkouška měniče.
Zkouška izolačního odporu a elektrické pevnosti	3.2.2
Zkouška mechanické pevnosti	4.3
Ochrana před škodlivým vnikem prachu, pevných těles a vlhkosti	4.1

Tabulka 4: Zkoušky planárního transformátoru, které se musí dle normy ČSN EN 61558-1 [2] a technických podmínek uskutečnit.

3.2.2 Kusové zkoušky

Výrobní kusové zkoušky se provádějí pro ověření, že výrobek je správně sestaven a všechny součásti spolehlivě a bezpečně pracují. Výrobní kusové zkoušky musí být provedeny výrobcem na každém kusu daného typu. Výrobce a uživatel se mohou dohodnout na alternativním postupu zkoušky. (Například ISO 9001).

Z logiky věci se jedná pouze o nedestruktivní zkoušky, je tedy žádoucí, aby byla například zkouška izolačního odporu na výrobku provedena maximálně jednou,

protože opakované provádění této konkrétní zkoušky rapidně zkracuje životnost.

Na planárním transformátoru se budou provádět následující kusové zkoušky:

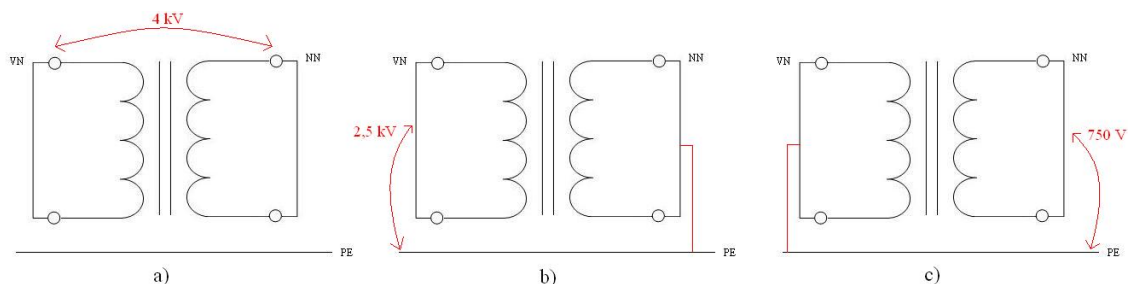
- Vizuální prohlídka

Vizuální prohlídka probíhá během výroby a sestává z optické kontroly před zalitím transformátoru, kdy se kontroluje mechanický stav transformátoru a správnost pájených spojů, a optické kontroly po zalití, kdy je nutné zkontrolovat, zda zalévací hmota je celistvá, má čistý rovný povrch lícující s okrajem hliníkového rámečku a zda nepřetéká přes jeho okraje.

Poslední optická kontrola probíhá po zbývajících bodech kusové zkoušky. Kontroluje se, zda nedošlo k mechanickému poškození transformátoru právě během výrobní kusové zkoušky.

- Zkouška elektrické pevnosti

Jedná se o zkoušku ověřující bezpečnost výrobku. Tato zkouška patří mezi



Obrázek 18: Schematicky zkouška výdržným napětím. a) mezi živými částmi vstupních a výstupních obvodů; b) mezi vstupními obvody a elektricky spojenými výstupními obvody s kostrou; c) mezi výstupními obvody a elektricky spojenými vstupními obvody s kostrou.

typové zkoušky, ale zároveň je i výrobní kusovou zkouškou, která se dělá na každém transformátoru. Sestává ze tří kroků: změření izolačního odporu, zkoušky výdržným napětím a následné ověření, zda nedošlo během zkoušky k snížení izolačního odporu.

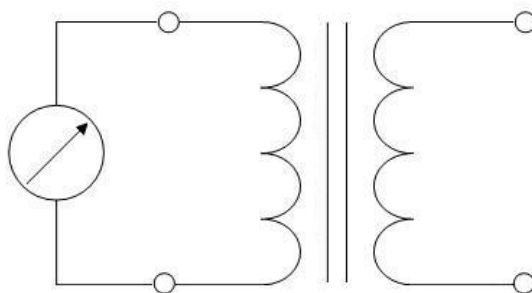
Způsob zapojení a jednotlivé kroky zkoušky výdržným napětím jsou na obrázku 18. Na měřicí body se přivádí zdroj sinusového napětí o frekvenci 50 Hz po dobu 1 min. Stejným způsobem se měří izolační odpor, ale na daná místa

(na obrázku šipky) se připojuje zdroj stejnosměrného napětí 1000 V a 500 V. Požadované hodnoty viz příloha.

- Změření indukčnosti

Indukčnost transformátoru je parametr, kterým se ověří správná konstrukce: sestavení, propájení vrstev.

Změří se indukčnost jak primárního, tak sekundárního vinutí, a to tak, že se mezi vinutí zapojí RLC metr a druhé vinutí se nechá naprázdno (obr. 19).



Obrázek 19: Schematicky měření parametru indukčnosti primárního vinutí, sekundární je rozpojeno. Měření indukčnosti sekundárního vinutí je analogické.

V příloze se nachází zkušební postup pro výrobní kusovou zkoušku i spolu s tabulkou požadovaných hodnot. Zároveň v rámci typových zkoušek byla zrealizována zkouška elektrické pevnosti, která proběhla úspěšně.

3.3 Zkoušky celého produktu výkonového měniče

Vývoj a realizace planárního transformátoru byla jen jedna část. Dílčí projekt zakázky, kterou byl výkonový statický měnič určený pro drážní zařízení. Zakázku na výkonový měnič vypisovala firma ŠKODA TRANSPORTATION, a.s. a zakázku vyhrála firma POLL, s.r.o. Jedná se o měniče, které budou umístěny v šestivozových dvoupatrových soupravách typu Push-Pull pro Deutsche Bahn Regio.

Každá ze souprav je provozována jako vratná, vozy jsou tedy lokomotivou buď taženy, nebo tlačeny. Souprava je složena z řídicího vozu, pěti vložených vozů a nové lokomotivy řady Emil Zátopek v novém designu pro Deutsche Bahn [19].

Na základě technických podmínek, na kterých se smluvily obě strany, normy ČSN EN 61287-1 [1] a dalších byly navrženy typové a kusové zkoušky pro výkonový měnič jako celek.

Pro ověření vývojové etapy byly realizovány vývojové zkoušky na prototypových vzorcích měniče. Zkoušky byly navrženy stejně jako typové, aby se odhalily případné chyby v konstrukci a nevyhovění normě či smluveným technickým podmínkám.

První sériově vyrobené kusy jsou potom podrobeny typovým zkouškám na základě normy ČSN EN 61287-1 [1]. Norma kromě zkušebních metod výkonových měničů v drážních vozidlech samozřejmě definuje názvosloví, provozní podmínky a všeobecné charakteristiky.

Norma se vztahuje na celou sestavu měniče včetně montáže. Sestava obsahuje:

- sestavy polovodičových součástek
- integrované chladičové systémy
- součástky DC meziobvodu, včetně veškerých nezbytných filtrů souvisejících s DC meziobvodu
- polovodičové spínací jednotky (semiconductor drive units SDU) a související snímače
- připojené ochranné obvody.

Do měniče se montují již vyzkoušené dílčí komponenty: DPS, planární prvky apod. Tím je zajištěna efektivita a rychlost zkoušek celého zařízení. Zároveň se zvyšuje kvalita výsledných výrobků a minimalizuje se expedice neshodných výrobků.

Norma pro výkonové měniče v drážních zařízeních spolu s technickými podmínkami definuje následující zkušební metody:

Zkouška	Typová zkouška	Kusová zkouška
Vizuální prohlídka, kontrola značení		X
Ověření rozměrů a tolerancí	X	
Vážení	X	
Zkouška malým zatížením		X
Měření hluku	X	
Zkouška oteplení	X	
Určení výkonových ztrát	X	
Napájecí přepětí a přechodná energie	X	
Náhlé změny zatížení	*	
Zkouška izolačního odporu		X
Zkouška dielektrická		X
Vibrace a rázy	X	
Elektromagnetická kompatibilita	X	
Zkouška skokové změny síťového napětí	X	
Zkouška krátkodobého přerušování napájení	X	
Zkouška výstupních charakteristik	X	X
Zkouška spouštění a opětovného spouštění	X	
Zkratová zkouška	X	
Zkouška přetížitelnosti	X	
Zkouška odpojení zátěže	X	

Tabulka 5: Zkušební metody pro pomocné výkonové statické měniče v drážních zařízeních; X – zkouška se provádí, * – jedná se o zkrat či odpojení napájení, ochrana řídicí elektronikou měniče [1]. Zkoušky v specifikované pro daný typ měniče vyrobený firmou POLL, s.r.o.

4 Zrealizované typové zkoušky

4.1 Parametry dané konstrukcí

Mezi typové zkoušky, kterým jsou podrobena všechna elektrotechnická zařízení, je ověření rozměrů a vážení zařízení. Tyto parametry jsou potom uvedeny v dokumentaci výrobku.

Ochrana před škodlivým vnikem prachu, pevných těles a vlhkosti je zajištěna krytem měniče: stupeň ochrany krytem IP20. Izolační hmota hermeticky utěsňuje vinutí a chrání proti vzdušné vlhkosti.

Další parametry, které je v případě transformátoru nutné dodržet, jsou vzdálenosti napříč izolací a povrchové cesty.

Dle normy ČSN EN 61558-1 [2] jsou předepsány izolační vzdálenosti mezi primárními a sekundárními vinutími. V případě planárního transformátoru firmy POLL, s.r.o. se jedná o transformátor zalitý izolační hmotou. Z toho by vyplývaly relativně malé izolační vzdálenosti, ale bylo by nutné transformátor podrobit dlouhodobé zkoušce stárnutí izolace. Proto byla zvolena konstrukce transformátoru s dvojnásobnými izolačními vzdálenostmi, které jsou nutné pro transformátory bez zalití. Tím je zajištěna dvojitá ochrana proti přeskokům a plazivým proudům. Pro jmenovité napětí na primární straně 400 V vyplývá, že vzdálenosti mezi primárními a sekundárními vrstvami vinutí musí být 8 mm.

4.2 Zkouška oteplení

Zkouška je prováděna pro ověření, že vypočtené oteplení v měřících bodech je menší než mezní hodnoty oteplení udávané výrobcem jednotlivých součástek a zařízení. Měřící body jsou vyspecifikovány před zkouškou oteplení, a to již během vývoje, nebo pak během vývojových zkoušek zařízení. Nutné je specifikovat maximální povolené oteplení v měřících bodech. Standardními místy pro měření bývají:

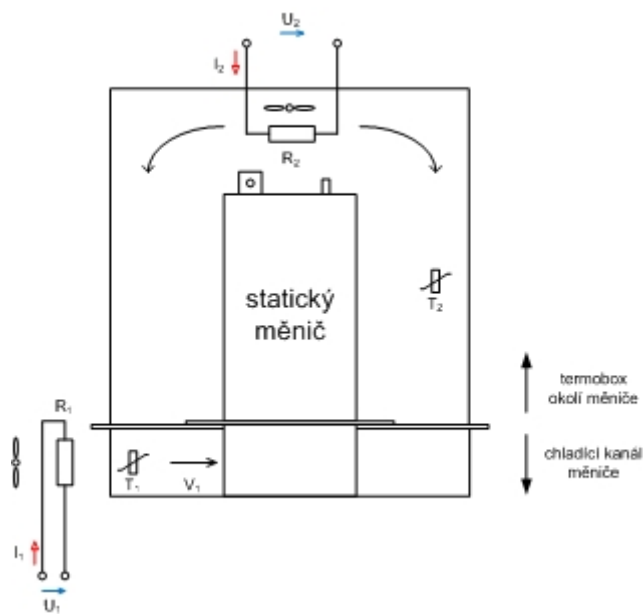
- sběrnice,

- rezistory,
- kondenzátory,
- spoje,
- chladiče.

V případě dalších kritických míst, jako je vinutí transformátorů a induktorů, se měří teplota v místě blízkém kritické oblasti.

Před zahájením zkoušky připojíme na měřicí body pro měření teploty součásti nebo dílčích částí zařízení kalibrované termočlánky.

Dále je nutné připravit prostory určených teplot pro simulaci ztížených pracovních podmínek apod. Schematicky na obrázku 20.



Obrázek 20: Schematicky zkouška oteplení.

Zařízení je zatíženo na nominální výkon a během měření je pak nutné, kromě teplot měřicích bodů, sledovat a zaznamenávat také teplotu okolí (případně klimatického boxu), napětí, proudy...

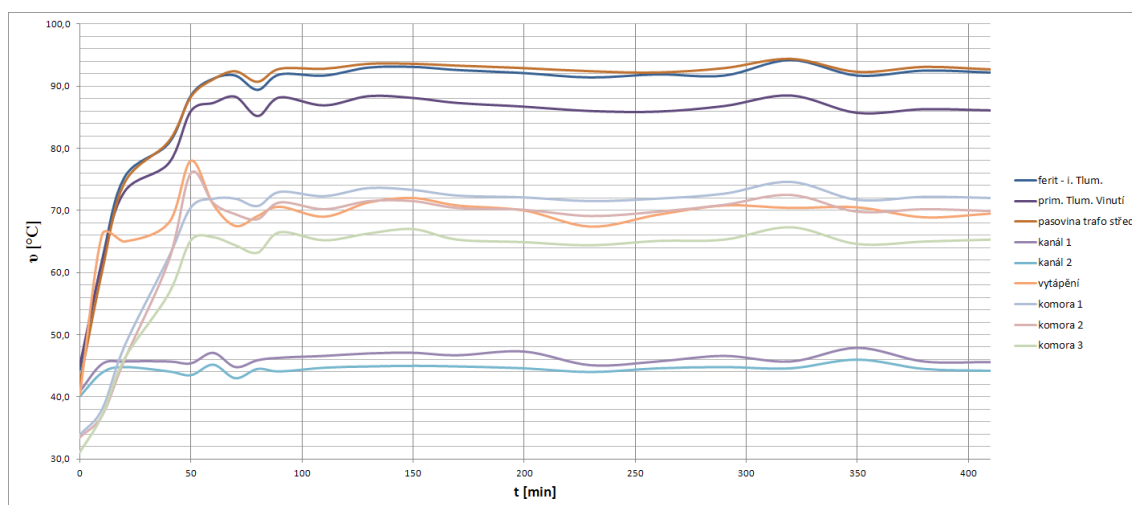
Měření provádíme nejprve po kratších časových úsecích (např. 5 minut), dokud nedojde k ustálení teplot v místech všech měřicích bodů (tři po sobě jdoucí měření

vykazují maximální rozdíl $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, což platí pro všechny jednotlivé měřící body). Po ustálení teplot se interval měření zvětšuje.

Během vývojové etapy byla realizována vývojová zkouška, která probíhala do ustálení teplot všech měřících bodů. Samotná typová zkouška pak probíhala dle normy ČSN EN 61287-1 [1]: měnič musel být podroben oteplovací zkoušce trvající šest hodin od ustálení teplot.

Další podmínkou bylo, že zkouška musí probíhat při zvýšené teplotě okolí. Do chladicího kanálu měniče měl vstupovat vzduch o teplotě cca $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a měnič měl být v klimatickém boxu, jehož teplota musela být cca $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zmíněné parametry jsou také zaznamenány v grafu (obr. 21).

Planární transformátor byl podroben oteplovací zkoušce uvnitř měniče. Kritériem přijatelnosti zkoušky bylo, že teplota, za daných podmínek, v žádném z měřících bodů transformátoru, nesmí překročit $110\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 21: Průběh úspěšné oteplovací zkoušky statického měniče — zde data pojící se k planárnímu transformátoru.

Na grafu zaznamenávajícím průběh oteplovací zkoušky (obr. 21) jsou vidět teploty měřících bodů transformátoru (hodnoty po ustálení viz tabulka 6). Postupně, jak byla klimatická komora temperována na požadovanou teplotu okolí $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (v grafu

označeno jako vytápění), ustálila se i teplota dílčích komponent měniče. Při odchylkách vytápění reagovala okamžitě změna teploty i na jednotlivých měřících bodech, proto je průběh lehce zvlněný.

Měřící bod	Pasovina ve středu transformátoru	Primární vinutí a vinutí tlumivky	Feritové jádro
ϑ [$^{\circ}C$]	92,4	86,9	91,8
$\Delta\vartheta$ [$^{\circ}C$]	23,0	17,5	22,4

Tabulka 6: Průměrné teploty měřících bodů planárního transformátoru a jejich oteplení, po ustálení teplot v klimatické komoře na teplotě 69,4 $^{\circ}C$ (jedná se o průměrnou teplotu z šesti hodin měření ve všech třech měřících bodech klimatického boxu), během zkoušky oteplení.

Zhodnocení zkoušky: zkouška je považována za úspěšnou, protože absolutní teploty, stejně jako oteplení všech součástí měniče, stejně jako dílčích míst planárního transformátoru, bylo rovno nebo menší než stanovené povolené hodnoty.

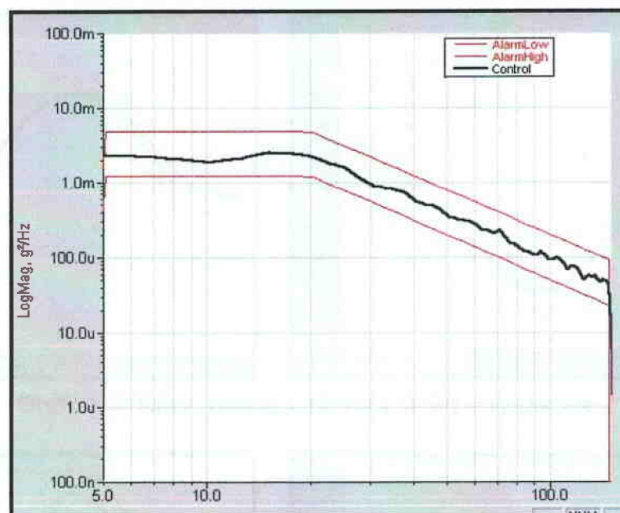
4.3 Zkouška mechanické pevnosti – vibrační zkouška

Transformátor musí být konstruován tak, aby odolal hrubému zacházení, které lze předpokládat při normálním použití. Vzhledem k tomu, že měnič bude jezdit na vlakové soupravě, byly zkoušky mechanické odolnosti navrhnuty s ohledem na to. Zároveň planární transformátor byl zkoušen zamontován v celé sestavě měniče. Během celé zkoušky byl měnič napájen 570 V DC a zatěžován rezistorem o velikosti 2,6 Ω . V diagnostickém nástroji (pomocí ETH připojeno k notebooku) byla průběžně během zkoušky kontrolována správná funkčnost měniče.

Zkouška probíhala ve Vojenském technickém ústavu, s.p. ve Vyškově v akreditované zkušební laboratoři. Zkouška proběhla s nastavením parametrů kontroléru zkušebních zařízení dle technických specifikací normy ČSN EN 61373, ed. 2:2011. Proběhly dvě části zkoušky:

- Simulované dlouhodobé zkoušky životnosti

Měnič byl podroben dlouhodobé zkoušce životnosti při zvýšených hladinách náhodných vibrací, a to postupně ve všech třech osách. Doba trvání jednoho úseku byla 5 hodin. Vibrace byly ve frekvenčním pásmu 5-150 Hz. Tato část měla odpovídat běžnému provozu vlakové soupravy a její jízdě po kolejích. Na obrázku 22 příklad výsledku v jedné z os: příčná osa X).



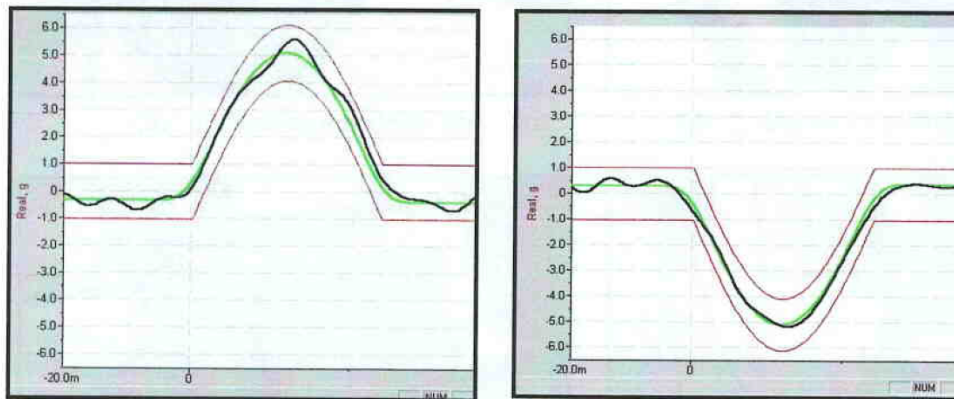
Obrázek 22: Dlouhodobá zkouška (příčná osa X). Červené jsou horní a dolní meze přijatelnosti. Obrázek z protokolu o zkoušce mechanické odolnosti, Vojenský technický ústav, s.p. ve Vyškově.

Po skončení zkoušky v každé zkušební ose byla provedena kontrola mechanického poškození a kontrola funkce.

- Rázy

I tato zkouška proběhla ve všech třech osách a byly při ní na měnič aplikovány tři pulsusové pulzy s kladnou a tři se zápornou půlvlnou. To mělo v normálním provozu odpovídat připojování vlakových souprav k sobě. Po skončení každé dílčí zkoušky byly opět provedeny kontroly mechanického poškození a funkce měniče.

Po ukončení všech zkoušek mechanické odolnosti nebylo shledáno zjevné mechanické poškození. To znamená, že nedošlo ke změně vnějšího vzhledu, mechanické



Obrázek 23: Zkouška rázy (kladný a záporný směr) – příčná osa X a podélná osa Y. Červené jsou horní a dolní meze přijatelnosti, zeleně reference. Obrázek z protokolu o zkoušce mechanické odolnosti, Vojenský technický ústav, s.p. ve Vyškově.



Obrázek 24: Fotodokumentace zkoušky mechanické odolnosti. Příklad ukotvení měniče ve zkušebním přípravku: zkoušky ve svislé ose Z. Obrázek z protokolu o zkoušce mechanické odolnosti, Vojenský technický ústav, s.p. ve Vyškově.

integrity, ani k porušení připojovacích prvků. Měníč byl po celou dobu v činnosti a po skončení mechanických zkoušek byla provedena zkouška funkčních charakteristik pro ověření funkčnosti zařízení.

4.4 Zkouška elektromagnetické kompatibility – EMC

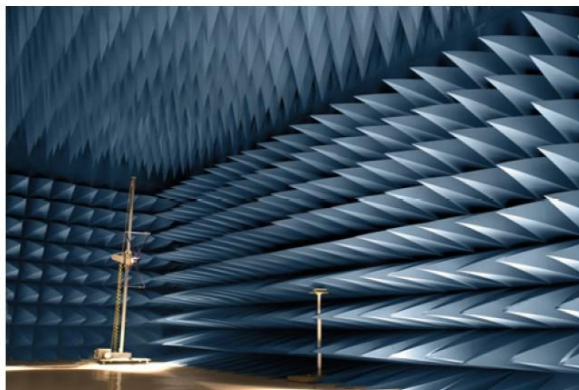
Zkouška elektromagnetické kompatibility není samostatnou zkouškou planárního transformátoru, ale uvádím ji tu jako jednu z kritických důležitých typových zkoušek statického měniče.

Definování zkoušek EMC pro měniče je předmětem mezinárodní normy IEC 62236-3-2 resp. ČSN EN 50121-3-2 ed. 2:2007. Důvodem zkoušky je diagnostika toho, jaké rušení šířené vedením nebo vyzařováním měnič vytváří. Nesmí mít negativní vliv na napájecí, telekomunikační a zabezpečovací systémy, ani na ostatní zařízení na vozidle.

Zkoušky prováděné na statickém měniči byly dvou typů: elektromagnetická interference, neboli emisivita zařízení (EMI), a elektromagnetická odolnost (EMS).

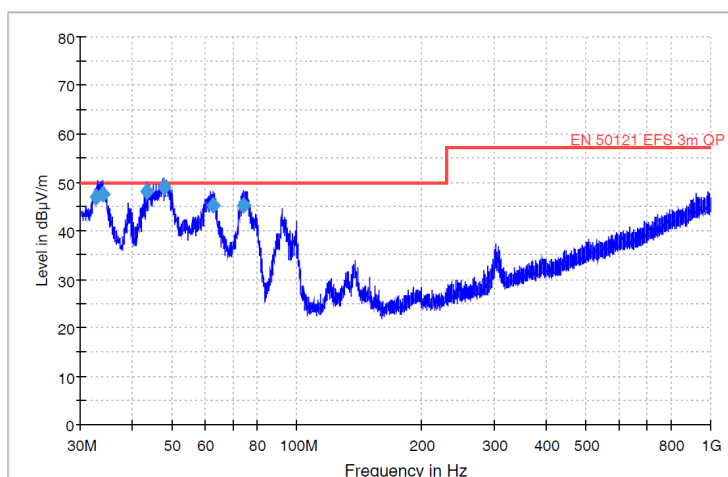
- Emise — Vstup/výstup krytem podle ČSN EN 50121-3-2 tab. 4 (EN 55011).
- Emise — Vstupy/výstupy měření a ovládání procesu podle ČSN EN 50121-3-2 tab. 5 (EN 55011).
- Emise — Vstupy/výstupy vztahující se k baterii podle ČSN EN 50121-3-2 tab. 6 (EN 55011).
- Odolnost — Vstupy/výstupy vztahující se k baterii podle ČSN EN 50121-3-2 tab. 7 (EN 61000-4-4, EN 61000-4-5 a EN 61000-4-6).
- Odolnost — Vstupy/výstupy signálů a komunikací, měření a ovládání procesu podle ČSN EN 50121-3-2 tab. 8 (EN 61000-4-4 a EN 61000-4-6).
- Odolnost — Vstupy/výstupy krytem podle ČSN EN 50121-3-2 tab. 9 (EN 61000-4-2 a EN 61000-4-3).

Z hlediska planárního transformátoru je důležité ověření stupně rušení EMI. Měření na zkušebním vzorku probíhalo v Elektrotechnickém zkušebním ústavu v Praze. Měření probíhá v „bezodrazová komora“ viz obr. 25.



Obrázek 25: Bezodrazová komora na měření EMC [20].

Pokud se měří EMI krytem, pak se v komoře instaluje anténa, kterou se měří vyzařování měniče, které by mohlo rušit zařízení galvanicky nespojená. Měření pokrývá frekvenční spektra, která jsou určena pro provoz rádia, vysílačky, mobilní telefony apod.



Obrázek 26: Výsledek dílčí zkoušky měniče – EMI. Obrázek z protokolu EMI Measurement, EZU Praha.

Zkoušené zařízení je zapnuto na plný výkon a anténou se snímají signály o frekvencích od 30 MHz do 1 GHz. Pozitivní výsledek tohoto měření je zachycen na

obrázku 26.

Dalším bodem zkoušení bylo EMI po kabelech signálů napájených z vozidlové baterie. V tomto případě se neinstaluje anténa, ale měřicí sonda rušivých signálů se instaluje přímo na kabely z měniče.

Elektromagnetická emisivita, stejně jako odolnost zkoušeného měniče, vyšla ve všech případech nižší, než je hranice definovaná normou. Zařízení bude v provozu odolné vůči rušivým signálům šířených galvanickou, kapacitní i induktivní vazbou. Zároveň nebude generovat rušivé signály nad normou určenou mez emisivity.

5 Závěr

Cílem práce bylo seznámit se s problematikou konkrétního nově vyvinutého elektrotechnického zařízení – planárního transformátoru – po teoretické stránce. Následujícím krokem bylo zmapování poslední části vývojové etapy tohoto zařízení s následným zahájením sériové výroby.

Všechny typové zkoušky planárního transformátoru proběhly úspěšně a ve druhém čtvrtletí roku 2015 začne, podle návrhu firmy POLL, s.r.o., sériová výroba transformátorů ve výrobě firmy Tronic spol. s r.o. Podle zkušebního postupu, popsaneho v této práci, se budou jednotlivé vyrobené kusy testovat, aby se zabránilo produkci neshodných kusů.

V nejbližší době se dokončí typové zkoušky pro celý měnič, na nichž se budu dál podílet, a začne výroba celého měniče. Měnič se bude montovat do dvoupatrových vlakových souprav, které budou jezdit v Německu na trase Norimberk—Ingolstadt—Mnichov.

Popsaný planární transformátor rozšířil firemní know-how firmy POLL, s.r.o. a v budoucnu bude možné jej použít i v jiných měničích s podobnými parametry.

6 Seznam použité literatury

- [1] Česká technická norma ČSN EN 61287-1. Drážní zařízení — Výkonové měniče instalované v drážních vozidlech — Část 1: Charakteristiky a zkušební metody. 2007.
- [2] Česká technická norma ČSN EN 61558-1. Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků — Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky. 2006.
- [3] BIELA, J. *Wirbelstromverluste in Wicklungen induktiver Bauelemente*. Zürich, 2012. Skriptum.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN* — technická literatura. Praha, 2002.
- [5] KOSINA, Petr. *Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu*. Brno, 2012. Disertační práce. VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Josef ŠANDERA.
- [6] DADAFSHAR, Majid. *Planar Transformer Designs Improve Power Supply Efficiency*. Pulse, a Technitrol Company Power Division. San Diego.
<http://www.pulseelectronics.com/download/3131/g214/pdf>.
- [7] ŠPÁNIK, Pavol, FEŇO, Ivan, KÁCSOR, Gabriel a LOKŠENINEC, Ivan. *Using Planar Transformers in Soft Switching DC/DC Power Converters*. Žilina, 2004.
- [8] DEKKER, Marcel. http://coefs.uncc.edu/mnoras/files/2013/03/Transformer-and-Inductor-Design-Handbook_Chapter_20.pdf.
The University of North Carolina at Charlotte. WordPress for the College of Engineering Faculty & Staff, 2004.
- [9] OUYANG, Ziwei, THOMSEN, Ole C., ANDERSEN, Michael A. E. *Optimal Design and Tradeoffs Analysis of Planar Transformer in High Power DC-DC Converters*. IEEE, 2010.

- [10] DOBROVOLNÝ, Petr. *Typové zkoušky — metodické pokyny*. POLL, s.r.o. Praha, 2015.
- [11] Vacuum Schmelze. *VITROPERM 500 F - VITROVAC 6030 F. Ringbandkerne in Leistungsübertragern für getaktete Stromversorgungen*.
<http://www.vacuumschmelze.de>.
- [12] Payton Planar. http://www.paytongroup.com/Planar_Transformers.
- [13] Pulse Electronic. *Product Overview — Planar Transformer*.
<http://www.pulseelectronics.com>.
- [14] Standex Meder Electronics.
http://www.standexelectronics.com/products/planar_transformers.htm.
- [15] Himag Planar. <http://www.himag.co.uk/page.asp?id=9>.
- [16] Premo – Planar Transformers.
<http://www.ppi-uk.com/premo-planar-transformers-acdc.php>.
- [17] Coilcraft Planar Magnetics.
http://www.coilcraft.com/prod_planar.cfm#.
- [18] Planar Quality Corporation.
<http://www.planars.com/home.html>.
- [19] Push-pull souprava Německo. ŠKODA TRANSPORTATION, a.s.
<http://www.skoda.cz/cs/produkty/osobni-vozy/souprava-nemecko/>.
- [20] Encyklopedie EMC. Ústav radioelektroniky VUT Brno. 2009.
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48>.

7 Seznam příloh

1. Zkušební postup pro kusovou zkoušku planárního transformátoru.
(Duševní vlastnictví firmy — nezveřejněno.)
2. Tabulka požadovaných hodnot pro kusovou zkoušku planárního transformátoru.
(Duševní vlastnictví firmy — nezveřejněno.)
3. Katalogový list výkonového planárního transformátoru — Payton Planar [12].

SIZE 5000 Power Capacity 5 to 20kW

Description

The Payton **SIZE 5000** provides a planar solution for high power applications (such as traction, induction heating etc.) providing high efficiency, low EMI, excellent repeatability, low profile and weight with an operating temperature range of -40°C to +130°C.



1. Transformer Application

POWER CAPACITY	DIMENSIONS (mm)	TYPICAL WEIGHT	DIELECTRIC ISOLATION	OPERATING VOLTAGE	OPERATING CURRENT (RMS)
5kW, forward at 50 kHz 20kW, full bridge at 100kHz	L = 180-230 W = 104-145 H = 20-60	2-3 kg.	500 V _{DC} - 4k V _{rms}	1000 V _{peak} max.	1000 A max.

Typical efficiency: 97-99%

Recommended frequency range: 20 kHz – 300 kHz.

Topologies:

Full bridge; Half bridge; Push-Pull; Forward;

Resonant topologies (in order of preference).

Mounting Options: a. Horizontal b. Vertical

2. Inductor Application

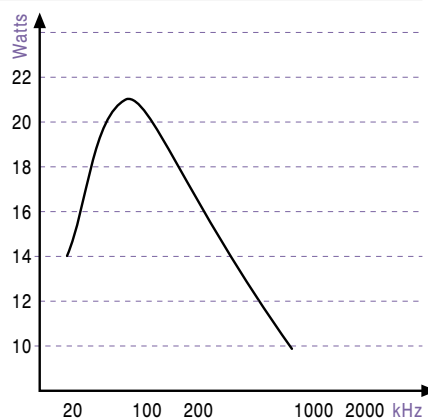
STANDARD A_L (nH/t ²)	1600	1000	630	400	315	250	160
TYPICAL VALUE OF MAX. Amper Turns	190	310	490	790	950	1202	1500

A_L values not listed are available upon request.

3. Typical Thermal Impedance For Different Cooling Conditions

NATURAL COOLING (Hot Spot - Air)	BLOWING AIR 3m/sec (Hot Spot - Air)	ONE SIDE HEATSINK (Hot Spot - Heatsink)	TWO SIDE HEATSINK (Hot Spot - Heatsink)
1.7°/W	1.3°/W	1.6°/W	0.8°/W

Power Capacity vs. Frequency*



*For single output AC to DC full bridge power supply transformer with turns ratio of 6.

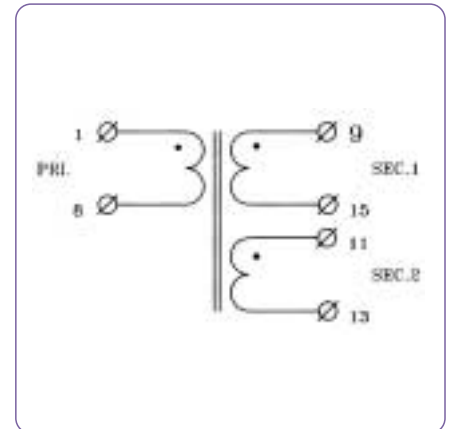
EXAMPLE

Transformer Type T5000 AC P.N. 11864

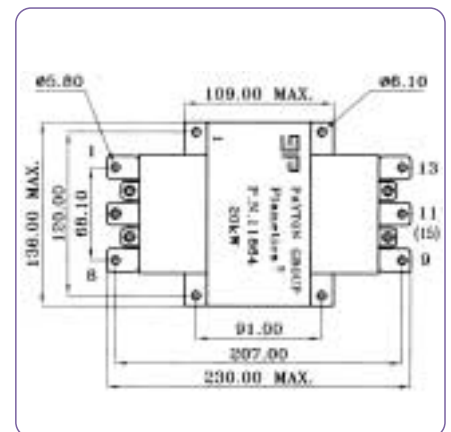
This T5000-16-6-6, super high power, high input voltage, high frequency, small dimensional planar transformer is developed for a high power density AC-DC converter and may be used in high power applications, providing the following specifications:

Transformer Specifications

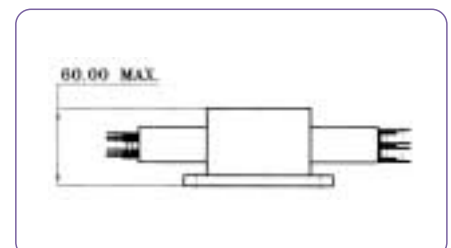
Total output power	20kW (590 Vdc@34 Adc)
Operating frequency	100 kHz
Input voltage range	815 - 900 Vdc
Topology	Full bridge, resonant
Max. Volt-Sec. product	8.15 V-msec
Duty cycle	2 x 0.5 max.
Primary current	27 Arms max.
Secondary 1,2 output current	30 Arms max.
Primary to Sec. 1,2 ratio	16 : 6
Dielectric strength pri. to sec.1+sec.2+core	3750 Vrms
sec.1, sec.2 to core	1500 Vrms
Ambient temperature	-20°C to +50°C
Total losses (With 45°C heat sink)	95W
Hotspot temperature (With 45 °C heatsink)	120°C max.
Weight	3000 gr.



ELECTRICAL DIAGRAM



TOP VIEW



SIDE VIEW

(All dimensions are given in mm.)