

TLUMIVKY V SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE – ČÁST 1

ZÁKLADNÍ DRUHY KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ TLUMIVEK

Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.
Katedra elektromagnetického pole
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6
Email: pankrac@fel.cvut.cz

Článek obsahuje porovnání základních druhů konstrukčního uspořádání tlumivek s ohledem na tvar magnetického obvodu a vinutí s přihlédnutím k výběru tlumivek pro různé aplikace.

1. ÚVOD

Tlumivka, zdánlivě nejjednodušší elektrický stroj, se používá v elektrotechnice odpradáвна pro nejrůznější aplikace, ve kterých slouží jako zásobník energie. Velice často se vyskytuje i v různých zařízeních silnoprůdé elektrotechniky, ať již se jedná o prvky rozvodné a distribuční soustavy, nebo komponenty elektrických pohonů.

Cílem tohoto příspěvku je obecný úvod do problematiky, která se zabývá návrhem tlumivek a zkoumáním jejich chování v aplikacích silnoprůdé elektrotechniky. V příspěvku jsou posuzovány základní konstrukční prvky, které jsou společně většině typů tlumivek bez ohledu na aplikaci. Skutečné uspořádání a způsob návrhu bude předmětem dalších příspěvků, stejně jako rozčlenění tlumivek s ohledem na konkrétní aplikace podle ČSN EN 60 289 - Tlumivky.

Tlumivky se v silnoprůdé elektrotechnice vyskytují v celém rozsahu výkonů i napětí, počínajíc jednotkami kVAr u malých tlumivek pro zařízení výkonové elektroniky, až po stovky MVar u olejových tlumivek pro kompenzaci kapacitního výkonu v sítích velmi vysokého napětí.

Energie je v tlumivkách akumulována do vybuzeného magnetického pole. Tlumivka dokáže energii přijímat a ve vhodný okamžik opět uvolňovat. Tento základní princip platí pro všechny aplikace, i když to na první pohled není vždy zřejmé. Výkon, který je potřebný pro vybuzení elektromagnetického pole, se v tlumivce nespoteřovává a nazývá se jalový.

Ve všech aplikacích je však základní obvodovou veličinou indukčnost tlumivky, která obecně představuje konstantu úměrnosti mezi vybuzeným magnetickým polem a budícím proudem.

Indukčnost lze definovat různými způsoby, které se liší tím, jakou veličinou a jakým způsobem bude magnetické pole reprezentováno. Pro první přiblížení lze základní definiční vztahy slovně charakterizovat následujícím způsobem: Ve statické definici je vybuzené magnetické

pole reprezentované magnetickým tokem procházejícím závity cívky, v energetické definici energií vybuzeného magnetického pole a v dynamické definici svými účinky – indukovaným napětím v cílce. Při konkrétním návrhu je taková obecná definice nedostatečná, indukčnost je nutné definovat exaktním způsobem tak, jak bude v některé z příštích částí uvedeno.

Magnetické pole je primárně buzené elektrickými proudy procházejícími ve vodičích. Všechny části protékané elektrickým proudem představují tedy v podstatě tlumivku s určitou indukčností. V blízkosti feromagnetických materiálů se magnetické pole mnohanásobně zesiluje. Pokud je magnetické pole vybuzeno pouze ve vzduchu, můžeme mluvit o tlumivkách bez feromagnetického obvodu. Tyto tlumivky jsou běžně označovány jako tlumivky vzduchové nebo tlumivky bez železa. Pokud je magnetické pole úmyslně buzeno ve feromagnetickém materiálu, můžeme mluvit o tlumivkách s feromagnetickým obvodem, které jsou běžně označovány jako tlumivky s magnetickým obvodem, nebo tlumivky se železným jádrem.

2. ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY PŘI POSOUZENÍ VHODNOSTI TLUMIVKY

Pro většinu aplikací lze použít jak tlumivky vzduchové, tak tlumivky s feromagnetickým obvodem. Ne vždy je však toto použití pro oba druhy stejně technicky a ekonomicky výhodné, každé provedení má své zásadní odlišnosti i okruh aplikací. Toto základní členění však představuje společný rys pro všechny druhy tlumivek, bez ohledu na konkrétní aplikaci a detailní konstrukční uspořádání.

Pokud je třeba zvolit konkrétní konstrukční variantu tlumivky, obvykle je nutné posoudit následující vstupní parametry:

- **Izolační hladinu** a z toho vyplývající nejvyšší provozní napětí, pro které je tlumivka určena [4]. Dále pak **způsob zapojení tlumivky do systému** [1]. Tím je dána hodnota napětí mezi svorkami tlumivky, svorkami a hladinou s definovaným referenčním potenciálem

(obvykle zemí), případně napětí mezi jednotlivými fázemi třífázové tlumivky. Na toto napětí musí být tlumivka konstruována tak, aby vyhověla všem normou předepsaným napěťovým zkouškám [4],[5].

- **Velikost proudu**, který tlumivkou poteče, a **obsah vyšších harmonických složek proudu**. Tím je rámcově předurčena vhodná konstrukce tlumivky. Tlumivku určenou pro převážně stejnosměrný proud je vhodné konstrukčně uspořádat jiným způsobem, než tlumivku pro proud základní harmonické (50 Hz). Stejně to platí i pro tlumivky protékané proudem s vysokým obsahem vyšších harmonických složek.
- **Provozní režim** určuje, zda bude tlumivka zatížena trvale, nebo pouze krátkodobě při určitém přechodném ději. Stanoví také případné pracovní rozpětí proudů, pro které by měla být zaručena určitá hodnota indukčnosti, popřípadě linearita.
- **Prostředí**, ve kterém bude tlumivka pracovat, udává, zda se bude jednat o vnitřní nebo venkovní provedení a stanoví případné extrémní klimatické vlivy, se kterými je nutno při návrhu počítat [7].
- **Konstrukční provedení tlumivky** musí být v souladu s konkrétními podmínkami a rozměry stanoviště, pro které je tlumivka určena. Zahrnuje také požadovaný stupeň krytí tlumivky [6].
- Při návrhu tlumivky je nezbytně nutné uvážit možnost **negativního ovlivnění a rušení** ostatních komponentů v systému a jeho okolí magnetickým polem tlumivky. S ohledem na konkrétní poměry je potom potřebné stanovit bezpečné vzdálenosti od ostatních prvků v systému.
- Je nutné uvážit také možnost vzniku **přepětí**, které může být vyvoláno spínacími pochody nebo atmosférickými impulzy. Toto přepětí může ohrozit elektrickou pevnost izolace tlumivky
- Tlumivka musí odolávat **účinkům zkratového proudu**, což zahrnuje odolnost proti dynamickým účinkům zkratového proudu i tepelnou zkratovou odolnost [6]. Prokázání zkratové odolnosti se provádí předepsanými zkouškami.

3. TLUMIVKY BEZ FEROMAGNETICKÉHO OBVODU

3.1. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA A OBLAST POUŽITÍ

Tlumivka bez feromagnetického obvodu je z obvodového hlediska vhodná v podstatě pro všechny aplikace, pokud není přesycování feromagnetického obvodu součástí funkce tlumivky (například přesytky). Tlumivka se vyznačuje svojí linearitou ve všech provozních stavech. Vzduch představuje magnetický obvod s lineární magnetizační charakteristikou, mezi elektrickým proudem a magnetickým tokem je lineární závislost bez ohledu na velikost proudu, indukčnost je konstantní.

Lineární charakteristika je velkou výhodou vzduchové tlumivky ve srovnání s tlumivkou s feromagnetickým obvodem. Za tuto výhodu je ovšem nutno zaplatit relativně velkými rozměry. Pro vybuzení magnetického pole a dosažení požadované indukčnosti tlumivky je třeba většího počtu proudovodičů (závitů cívek), než by tomu bylo u cívek s feromagnetickým obvodem. Magnetické pole není zesilováno žádným feromagnetickým materiálem. S tím je jednoznačně svázána i relativně velká hmotnost vodičů na vinutí tlumivek (mědi, hliníku).

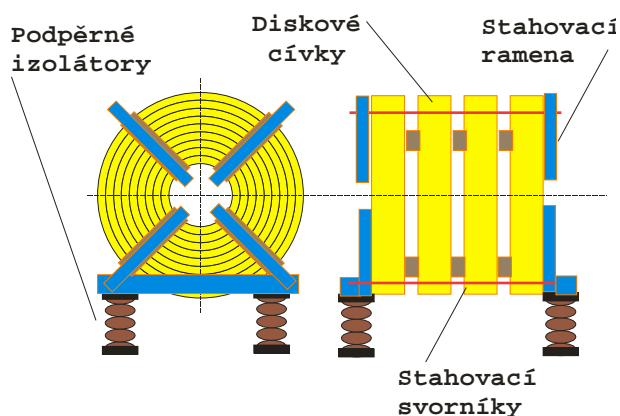
Další velkou nevýhodou tlumivek bez feromagnetického obvodu je silné magnetické pole, které zasahuje nejen do konstrukčních prvků vlastní tlumivky, ale i do celého širokého okolí tlumivky. Tyto tlumivky nejsou proto příliš vhodné pro aplikace, ve kterých by mohlo magnetické pole negativně ovlivnit prvky, které se nacházejí v dosahu tlumivky. Pokud se v blízkosti nacházejí feromagnetické materiály, vznikají v nich při střídavých magnetických polích ztráty způsobené přemagnetováním (hysterezní ztráty). Ve vodivých materiálech se vlivem střídavého magnetického pole indukují vířivé proudy. Velké proudy se rovněž mohou indukovat do všech částí, které tvoří závity spojené nakrátko. Všechny tyto jevy dokáží způsobit zvýšení ztrát a oteplení. To platí například i pro výztužné armování v betonových konstrukcích pod tlumivkou, kovové stěny skříní, do kterých by byla tlumivka případně uzavřena. Obecně lze konstatovat, že vzduchové tlumivky vyžadují kolem sebe více prostoru, než by tomu bylo za stejných podmínek u tlumivek s feromagnetickým obvodem. V případě vzduchových tlumivek velkého výkonu to v sobě mnohdy zahrnuje i určité speciální stavební úpravy prostoru, ve kterém je tlumivka nainstalována, při kterých je nutno odstranit z okolí tlumivky všechny vodivé a feromagnetické části. Silné elektromagnetické pole dokáže samozřejmě negativně ovlivnit i různé elektronické a sdělovací přístroje a zařízení.

3.2. TLUMIVKY PRO OBVODY STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU

Pro malé výkony (v řádu jednotek kVar) se používají tlumivky nejrozmanitějších konstrukcí, často v kompaktním provedení, kdy je vinutí zalito do vhodné izolační hmoty. To usnadňuje použití tlumivek v různých zařízeních výkonové elektroniky.

Pro velké výkony (řádu desítek až stovek kVAr) a vnitřní prostředí, jak je tomu u velkých elektrických pohonů, se velice často používají tlumivky v podobě mohutných diskových cívek, které jsou spojeny paralelně nebo do série (obr. 1). Jsou to například různé typy vyhlazovacích tlumivek. Bývají navinuty z masivních hliníkových (méně často měděných) neizolovaných pásových vodičů, mezi které je izolace vkládána až při navíjení. Tlumivkou prochází stejnosměrný proud, na který je superponována malá střídavá složka. Masivní vodiče je tak možné použít bez obav ze skin efektu, jehož účinek by byl pro střídavé proudy značný.

U tohoto typu konstrukce tlumivky je velmi efektivně využit prostor, je zaplněn závit, mezi kterými je pouze nezbytně nutná izolace. Diskové cívky jsou pomocí svorníků staženy mezi masivní ocelová nebo hliníková ramena a k této konstrukci jsou připevněny podpěrné izolátory. I v tomto případě platí, že přítomnost masivních kovových částí a svorníků nebude představovat s ohledem na převážně stejnosměrné magnetické pole velký problém a nebude působit zvýšení ztrát nebo nežádoucí oteplování. Tlumivky tohoto typu jsou s ohledem na svoji robustní konstrukci mechanicky pevné a dobře odolávají dynamickým silám, které vznikají při zkratech.



Obr.č.1: Vzduchová tlumivka do stejnosměrných obvodů

Izolační hladina tlumivky této konstrukce je dána prakticky vlastnostmi použitých izolátorů. Pro aplikace výkonové elektroniky jsou obvykle požadovány tlumivky s nejvyšším provozním napětím v hladinách do 36 kV.

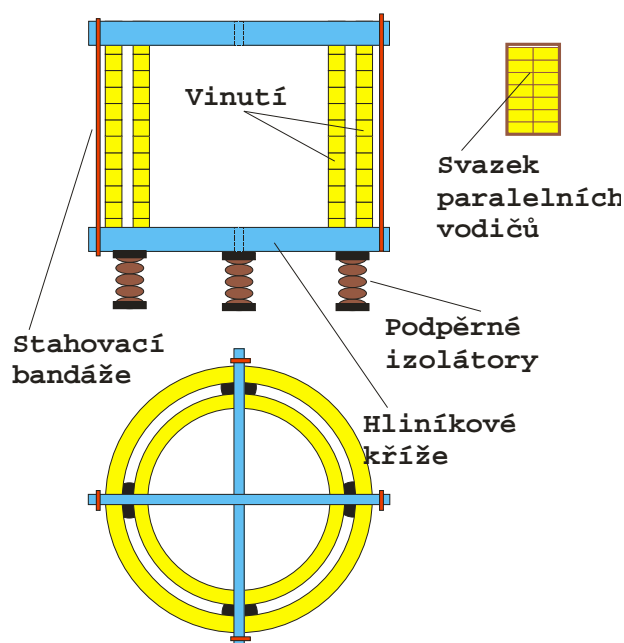
3.3. TLUMIVKY PRO OBVODY STŘÍDAVÉHO PROUDU

Pro aplikace v obvodech střídavého proudu je předchozí typ konstrukce s masivními vodiči méně vhodný, protože by u něho docházelo k extrémně vysokým ztrátám způsobeným skin efektem ve vodičích. Ztráty skin efektem jsou totiž úměrné tloušťce použitých vodičů a potažmo i počtu vodičů v radiálním směru. Na to nebylo třeba brát u stejnosměrných tlumivek příliš velký ohled.

Pro malé výkony se i zde, podobně jako v obvodech stejnosměrného proudu, používají tlumivky

nejrozmanitějších konstrukcí, často v kompaktním zapouzdřeném provedení.

Pro větší výkony se ve světě ustálila konstrukce, ve které jsou samonosné vzduchové cívky, navinuté v podobě jedné či více vrstev, staženy bandážemi do hliníkových nosných konstrukčních křížů či hvězdic (obr.2). K nosným křížům jsou připevněny podpěrné izolátory, popřípadě izolátory, které u vícefázových tlumivek navzájem oddělují vinutí různých fází. Na ramena stahovací konstrukce, která slouží současně jako přívodní sběrnice, jsou přímo vyvedeny konce vinutí. Střídavé tlumivky tohoto typu jsou vhodné pro vnitřní i venkovní prostředí.

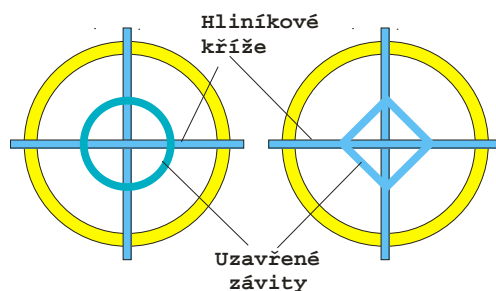


Obr.č.2: Standardní provedení tlumivky pro střídavé proudy

Pro omezení ztrát způsobených skin efektem jsou cívky obvykle vinuty ze svazku tenkých paralelně spojených vodičů, které jsou po délce cyklicky prostrídány (vyměňují si svoje polohy).

Zkušenosti, výpočty a měření ukazují, že stahovací konstrukce sama o sobě nepředstavuje podstatný zdroj přídatných ztrát. Vířivé proudy, které v ní vznikají, mají zanedbatelnou velikost a neovlivňují vybuzené magnetické pole. Nemají tedy podstatný vliv ani na indukčnost tlumivky.

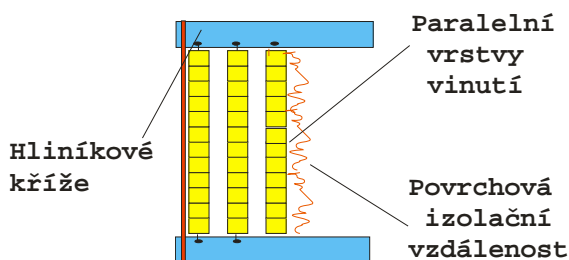
Případné konstrukční výztuhy by neměly být nikdy navrženy tak, aby tvořily závit nakrátko (obr.3). Existují však tlumivky, například pro elektrické filtry, do kterých se vkládá závit nakrátko úmyslně. Ztráty v tomto závitě snižují činitel jakosti cívk a potom není třeba do série s tlumivkou zapojovat rezistor. Tlumivky, které jsou navrženy s ohledem na dovolené oteplení a účinky zkratového proudu, mají obvykle velikost činného odporu příliš malou, filtry by měly nežádoucí příliš strmou charakteristiku.



Obr.č.3: Výztuhy stahovacích křížů tvořící závit nakrátko

Pro větší proudové zatížení se používají cívky s větším počtem vrstev, které se obvykle spojují paralelně (obr.4). Při paralelním spojení vrstev je třeba vhodnou úpravou zajistit rovnoměrné dělení proudu mezi jednotlivé vrstvy.

Takto konstruovaná tlumivka má velice dobré napěťové vlastnosti, izolační pevnost vzhledem k referenčnímu potenciálu (zemi) je zajištěna vhodnými izolátory, izolační pevnost mezi svorkami tlumivky je dána velkou vzdáleností po povrchu vinutí mezi horním a dolním křížem (hvězdicí) stahovací konstrukce. V izolačním kanále mezi sousedními vrstvami a mezi koncem vinutí a ramenem stahovacího kříže je velmi malé napětí.



Obr.č.4: Paralelně spojené vrstvy střídavé tlumivky

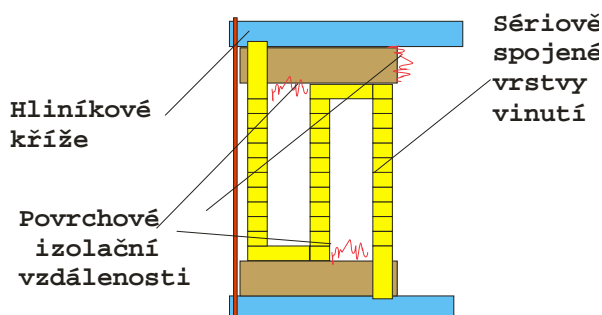
Varianeta tlumivky v tomto provedení je vhodná i pro venkovní prostředí a běžně se používá pro střídavé systémy s izolační hladinou do 36kV.

Vinutí může být opatřeno speciální povrchovou úpravou, nebo zalito do izolační hmoty. Rovněž masivní hliníkové prvky stahovací konstrukce velice dobře odolávají povětrnostním vlivům.

Silné znečištění, sníh ani déšť, povrchovou izolační cestu a další vynikající elektrické vlastnosti tlumivky příliš nezhorší.

Také rozložení napětí podél vinutí při přechodových dějích je velmi příznivé a je velice blízké lineárnímu rozložení. Rozložení napětí není narozdíl od tlumivek na magnetickém obvodu nepříznivě ovlivněno velkými kapacitami proti zemi.

Sériové spojování vrstev by bylo z hlediska rozdělení proudu příznivější a výrobně jednodušší, než paralelně spojené vrstvy (obr.5). Z hlediska izolační pevnosti však vnáší spoustu problematických momentů. Mezi sousedními vrstvami totiž již není nepatrné elektrické napětí, ale součtové napětí vrstev. Mezi křížem stahovací konstrukce a vinutím na příslušné straně se dokonce objeví napětí, které se rovná prakticky celému napětí mezi svorkami tlumivky.



Obr.č.5: Sériově spojené vrstvy střídavé tlumivky s nejvíce napěťově namáhanými místy

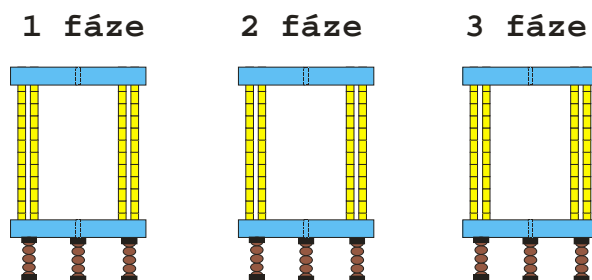
U tohoto provedení by musely mít vrstvy navzájem poměrně velkou radiální vzdálenost. Také proti křížům (hvězdicím) stahovací konstrukce by musely být odděleny zesílenou izolací s barierami. Všeobecně platí, že o izolační pevnosti tlumivky rozhoduje napěťové namáhání po povrchu daných izolačních materiálů. Průraz masou izolační hmoty je méně pravděpodobný.

Ani rázové rozložení napětí podél vinutí není zdaleka tak příznivé, je negativně ovlivněno kapacitami mezi sousedními vrstvami. Vinutí začne elektricky kmitat a mezi jednotlivými částmi se potom objeví podstatně větší napětí, než by odpovídalo lineárnímu rozložení. Takové napětí může v mezním případě ohrozit i izolační pevnost vinutí tlumivky.

Podobné konstrukční provedení se někdy používá pro vnitřní prostředí, pro venkovní pouze výjimečně.

3.4. TLUMIVKY V TŘÍFÁZOVÉM PROVEDENÍ

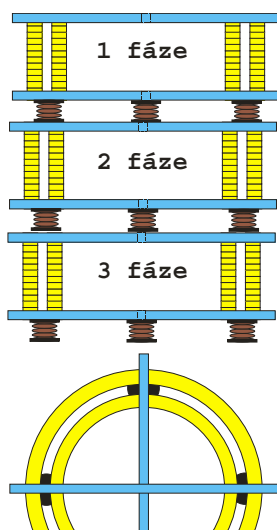
Tlumivky bez feromagnetického obvodu se běžně používají i pro třífázové aplikace. Tlumivky jednotlivých fází jsou s ohledem na konkrétní podmínky umístěny buď vedle sebe nebo nad sebou.



Obr.č.6: Třífázové provedení vzduchové tlumivky s fázovými cívkami vedle sebe

Pokud je to možné, tak se v případě umístění tlumivek vedle sebe tlumivky staví do takových vzdáleností, aby se vzájemně neovlivňovaly, potom se jedná prakticky o samostatné cívky (obr.6).

V případě umístění jednotlivých fázových tlumivek nad sebou se projeví vliv vzájemné indukčnosti. Vzájemná indukčnost není pro všechny dvojice fázových tlumivek stejná a vnáší do systému určitou nesymetrii (obr.7). Tuto nesymetrii je možno kompenzovat při konstrukci úpravou vinutí tlumivky v prostření fáze. Vlivem těsnější vazby se výrazně projeví i dynamické účinky zkratového proudu.



Obr.č.7: Třífázová vzduchová tlumivka s fázovými cívkami umístěnými nad sebou

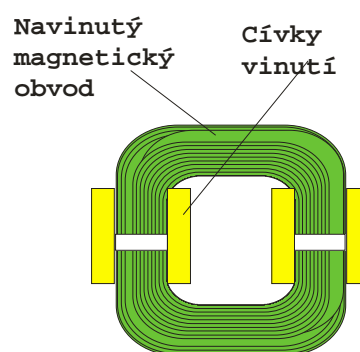
4. TLUMIVKY S FEROMAGNETICKÝM OBVODEM

U těchto typů konstrukcí tlumivek jsou cívky umístěny na feromagnetických obvodech, do kterých je uzavřena převážná část vybuzeného magnetického pole. Zbytkový magnetický tok, které se uzavírá mimo magnetický obvod, se nazývá rozptylový.

Magnetické obvody bývají u tlumivek větších výkonů (řádově stovky kVar a výše) většinou poskládány ze speciálních plechů pro elektrotechniku. Jedná se obvykle o za studena válcované plechy se speciální strukturou

(orientované plechy), které vykazují ve směru válcování vynikající magnetické vlastnosti. Pro běžné aplikace s průmyslovými kmitočty 50 Hz se používají plechy o tloušťce přibližně 0.3 mm, které mají při tomto kmitočtu velmi výhodné vlastnosti, ale například již pro kmitočty 400 Hz se jejich ztráty zvyšují téměř desetinásobně.

Pro malé výkony a případně i aplikace výkonové elektroniky s vyššími kmitočty se používají magnetické obvody, které jsou konstruovány z podstatně tenčích pásů, například 0.1 mm, čímž se výrazně omezí ztráty způsobené vířivými proudy. Použití takových tenkých pásů je však náročné na technologické zpracování, magnetické obvody se z takových plechů obvykle neskládají, ale používají se již předem navinutá a slepená jádra (obr.8)

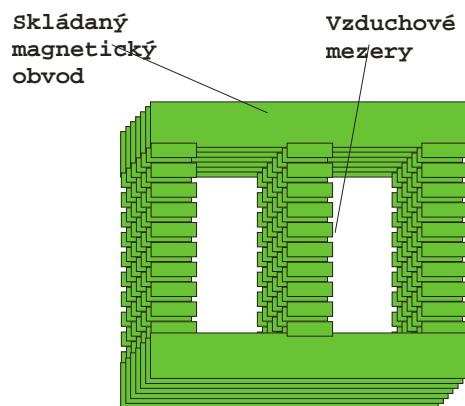


Obr.č.8: Tlumivka na magnetickém obvodu navinutém ze svitku

Další možnou alternativou jsou jádra zhotovená z feritových materiálů, ta však nejsou u tlumivek větších výkonů (řádu stovek kVar a výše), kdy se jedná o stroje velkých rozměrů, prakticky použitelná. Feritové materiály mají velice dobré vlastnosti na vysokých kmitočtech, jejich nevýhodou je však to, že se přesycují při podstatně nižších hodnotách magnetické indukce. Pro ilustraci je možno uvést, že u orientovaných plechů je možno dosáhnout běžně sycení 1.7 T, u feritových materiálů se pohybuje pouze kolem 0.3 T. Pro oblast průmyslových kmitočtů (50Hz) nepřináší použití feritových jader podstatnou výhodu, při návrhu by naopak vedlo na stroje větších rozměrů.

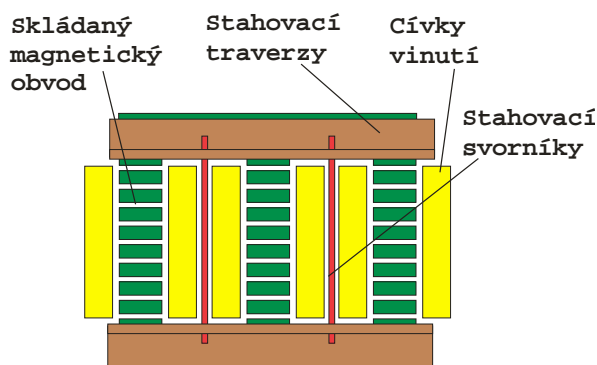
4.1. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Pro tlumivky s feromagnetickým obvodem se pro větší výkony používá klasické jádrové nebo plášťové provedení, jádra jsou rozdělena vzduchovými mezerami na větší počet částí (obr.9).



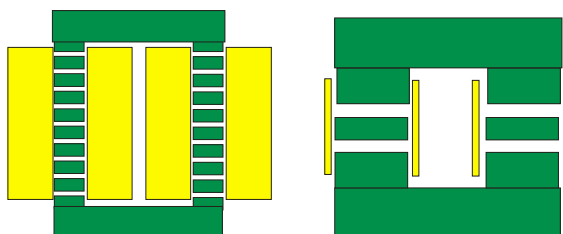
Obr.č.9: Třífázový jádrový obvod se vzduchovými mezerami

Horní a dolní spojka magnetického obvodu je stažena ocelovými profilovými konstrukčními prvky, které se obvykle nazývají traverzy nebo bočnice. Tyto prvky jsou propojeny ocelovými svorníky. Svorníky musí být od konstrukce izolovány tak, aby netvořily závity nakrátko (obr.10).



Obr.č.10: Třífázový jádrový magnetický obvod s cívkami a stahovací konstrukcí

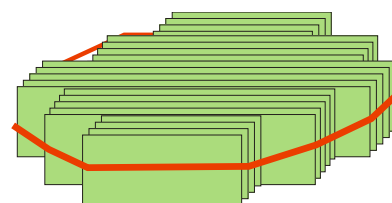
Návrh tlumivky na magnetickém obvodu není jednoznačný. Pro přibližně stejné zadání a stejné technické parametry lze sestavit tlumivku s „lehkým“ vinutím a „těžkým“ magnetickým obvodem a platí to i naopak (obr.11). Potom je třeba volit podle určitých kritérií variantu optimální pro dané uspořádání.



Obr.č.11: Různé varianty návrhu tlumivky

Návrh, optimalizovaný s ohledem na technické parametry, rozměry a hmotnosti, však velmi často vede na magnetický obvod s poměrně velkým počtem vzduchových mezer v jádrech. Části jádra magnetického obvodu mezi dvěma vzduchovými mezerami tvoří segmenty, jejichž obvod může kopírovat kružnici, při snaze o maximální vyplnění průřezu válcových cívek (obr.12).

Tyto segmenty představují velmi slabé místo tlumivek, je třeba z nich vytvořit kompaktní části a ty potom zajistit proti mechanickým vibracím, ke kterým u tlumivek vždy dochází. Vibracím nezabrání ani pevné stažení nebo slepení segmentů, jejich vliv lze pouze omezit. Velikost hluku a vibrací podstatně ovlivňuje i velikost vzduchové mezery, není vhodné ani možné volit příliš velké mezery.



Obr.č.12: Segment magnetického obvodu tlumivky poskládaný z plechů

4.2. KLIMATICKÁ ODOLNOST TLUMIVEK S FEROMAGNETICKÝM OBVODEM

Magnetický obvod složený z plechů a stahovací konstrukce v podobě ocelových prvků a svorníků již sama o sobě představuje soustavu, která vůči klimatickým vlivům příliš odolná není. I při speciální protikorozi úpravě se jen velmi obtížně zabrání tomu, aby nedošlo ke korozi magnetického obvodu a ostatních částí.

Vinutí tlumivky může mít navíc při rozměrově optimálním návrhu jen malou vzdálenost od uzemněného magnetického obvodu a není možné jej jednoduše oddělit pomocí vložených izolačních dílů. Celou situaci by navíc podstatně zhoršily povětrnostní vlivy a vodivé nánosy způsobené znečištěním.

Tlumivky, stejně jako transformátory, se s krytím IP00 navrhují pro vnitřní prostředí, v případě venkovního prostředí musí být umístěny ve skříních, nebo alespoň pod přístřeškem. Bez velkých problémů se používají pro zařízení s izolační hladinou do 36 kV.

4.3. TLUMIVKY S OLEJOVÝM CHLAZENÍM

Tam, kde není možné použít tlumivky v suchém provedení, se používají tlumivky chlazené izolačním olejem. To je obvykle v případě velkých výkonů (desítek až stovek MVar) a v izolačních hladinách nad 121 kV.

Tlumivky této konstrukce jsou umístěny v olejových nádobách, které jsou opatřeny zařízením pro odvod tepla, jako jsou například vlny nebo radiátory či různé typy chladičů.

Svojí konstrukcí, stavbou vinutí i magnetického obvodu, se podobají velkým výkonovým transformátorům. Rovněž problematika návrhu vinutí, napětového namáhání, určování oteplení a účinků zkratových sil, je velmi podobná olejovým transformátorům.

4.4. ODOLNOST PROTI ZKRATU A NADPROUDŮM

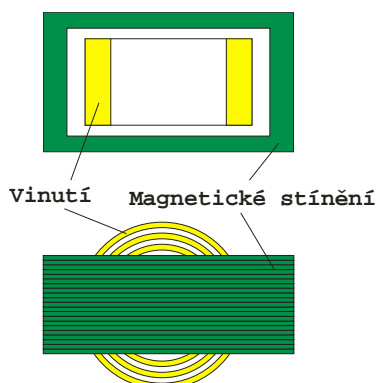
Pro správnou funkci tlumivky s feromagnetickým obvodem je obvykle žádoucí, aby se její pracovní bod pohyboval v různých provozních stavech v lineární oblasti magnetizační charakteristiky. Při překročení mezní hodnoty magnetické indukce se magnetický obvod začíná přesycovat, tlumivka postupně ztrácí schopnost omezovat a vyhlazovat elektrický proud.

Pro hrubé přiblížení je možné uvést případ, kdy by bylo potřeba navrhnout tlumivku s feromagnetickým obvodem v aplikaci, ve které by měla omezovat zkratové proudy a nadproudy o desetinásobně větší hodnotě, než je jmenovitý proud tlumivky.

Potom by musel být magnetický obvod navržen na syčení při stanoveném nadproudu, při jmenovitém proudu by bylo syčení magnetického obvodu desetkrát menší, magnetický obvod by byl nevyužitý a toto provedení by ve srovnání se vzduchovou tlumivkou téměř přestalo být výhodné. Stále by však zůstala velká výhoda v tom, že magnetické pole podstatně neproniká do okolí tlumivky.

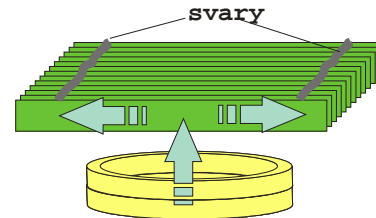
4.5. TLUMIVKA S MAGNETICKÝM STÍNĚNÍM

Velice užitečné kompromisní řešení představuje tlumivka, jejíž magnetický obvod tvoří stínící plášť kolem cívky. Toto řešení se často používá jak pro tlumivky malých výkonů (tlumivky s výkonem desítek kVar v obvodech výkonové elektroniky) až po největší výkony (řádů stovek MVar u síťových tlumivek pro kompenzaci kapacitního výkonu). Magnetický obvod tvoří v tomto případě kolem cívky plášť (obr.13), který je obvykle navržen tak, aby se při jmenovitých proudech a současně i nadproudech nepřesycoval. Tlumivka s touto konstrukcí má potom téměř lineární charakteristiku podobně jako vzduchová tlumivka. Hlavní výhodou je, že magnetické pole zůstává koncentrováno převážně v plášti magnetického obvodu, navenek neproniká v takové míře, aby způsobovalo podstatné komplikace.



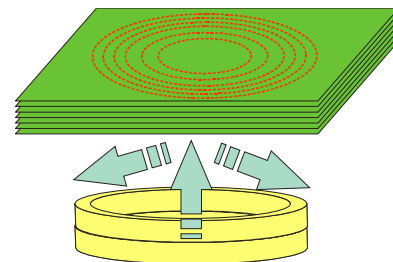
Obr.č.13: Tlumivka s magnetickým stíněním

Magnetický obvod, pokud je složen z plechů, musí být sestaven tak, aby magnetické pole vstupovalo rovnoběžně s vrstvením plechů. Toto konstrukční řešení vede na široké pakety poskládané z úzkých pruhů plechu, které je třeba mechanicky pevně zakotvit (Obr.14)



Obr.č.14: Horní spojka magnetického stínění tlumivky při správné orientaci plechů

Z konstrukčního hlediska se to proto nejeví jako optimálním řešením. Provedení, u kterého by magnetický tok vstupoval do stínění kolmo, by se na první pohled jevilo jako konstrukčně jednodušší. S ohledem na vířivé proudy, které by v plechách stínění vznikaly, by však stínění fungovalo velice špatně, magnetický tok by se ze stínění vytlačoval ven (obr.15).



Obr.č.15: Horní spojka magnetického stínění tlumivky při chybné orientaci plechů

Magnetické obvody velkých strojů se vkládají do rámců speciální stahovací konstrukce. Takové konstrukční uspořádání je potom použitelné i v třífázovém provedení. Magnetické obvody společně s vinutím každé fáze tvoří kompaktní celky, které jsou umístěny nad sebou nebo vedle sebe.

Pro stroje malých výkonů (řádu desítek kVar) je možné problém s řádným stažením plechů vyřešit přímo svary na jedné straně povrchu plechů, funkci stínění to v podstatě neovlivní (obr.14).

5. ZÁVĚR

V tomto úvodním přehledovém příspěvku byly rámcově popsány základní typy konstrukčního uspořádání tlumivek používaných v silnoproudé elektrotechnice, zejména s ohledem na konstrukci magnetického obvodu.

Nemůže se jednat o výčet úplný, počet různých aplikací i konstrukčních uspořádání je značně veliký.

Možné aplikace tlumivek byly v příspěvku velmi hrubě rozčleněny na aplikace pro obvody stejnosměrného a střídavého proudu. V dalším příspěvku bude tato tematika podrobněji rozvinuta a budou popsány detailně aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice včetně příkladu použití tak, jak jsou klasifikovány v [1].

Tlumivky bez feromagnetického obvodu se vyznačují lineární charakteristikou, jejich konstrukce může být relativně jednoduchá, bez velkého počtu feromagnetických či jiných konstrukčních částí, které by se podílely na zvyšování ztrát a oteplení tlumivky.

Je možné snadno vytvořit takové konstrukční uspořádání, které bude velmi odolné proti klimatickým vlivům. Použití vzduchových tlumivek není proto omezeno pouze na vnitřní prostředí, bez jakýchkoliv podstatných úprav je lze použít i ve venkovním prostředí.

Tlumivky v tomto provedení dobře odolávají dynamickým i tepelným účinkům zkratových proudů.

Problematika týkající se návrhu vzduchových tlumivek je poměrně široká a není možno ji uceleně popsat v rámci jednoho příspěvku. Bude podrobně popsána v další části včetně přesného výpočtu indukčnosti pro různá geometrická uspořádání, výpočtu ztrát a oteplení vinutí tlumivky, ověření zkratové odolnosti a výpočtů rozložení napětí na jednotlivých elementech vinutí při napěťových přechodných stavech.

Určitou nevýhodou vzduchových tlumivek je relativně silné magnetické pole, které kolem sebe vytvářejí. Na to je nutné brát ohled při umístění tlumivky do systému výkonové elektroniky či distribučních a přenosových sítí. I této problematice bude věnována samostatná ucelená část s přesnější kvantifikací celého problému.

Tlumivky s feromagnetickými obvody samy o sobě lineární nejsou. Při jejich použití je pro správnou funkci třeba přesně stanovit jejich pracovní bod. Mohou však být ve srovnání se vzduchovými tlumivkami menší a navíc kolem sebe nevytvářejí tak silné magnetické pole, je možné je použít pro vestavění do skříní, či do blízkosti jiných komponent systému, bez nebezpečí vzájemného ovlivňování. Chování těchto tlumivek je do značné míry dáno vlastnostmi použitého feromagnetického materiálu. Ani této problematice nebylo možné věnovat na omezeném prostoru náležitou pozornost a bude to podrobněji popsáno v další ucelené části.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60289 Tlumivky
- [2] ČSN EN 60076-1 Výkonové transformátory -
Část 1: Všeobecně
- [3] ČSN EN 60076-2 Výkonové transformátory -
Část 2: Oteplení
- [4] ČSN EN 60076-3 Výkonové transformátory -
Část 3: Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější
vzdušné vzdálenosti
- [5] ČSN EN 60076-4 Výkonové transformátory -
Část 4: Průvodce zkouškami atmosférickým a spínacím
impulzním napětím
- [6] ČSN EN 60076-5 Výkonové transformátory -
Část 5: Zkratová odolnost- Výkonové transformátory
a tlumivky
- [7] HARLOW, James H.: Electric Power Transformer
Engineering, CRC Press, 2007
- [8] DWIGHT, H.B.: Electrical Coils and Conductors, New
York: McGraw-. Hill, 1945