

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

K-rated transformátory

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Daniel VESELÝ**
Osobní číslo: **E17B0058P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **K-rated transformátory**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

1. Popište ztráty v transformátoru při napájení nelineární zátěží.
2. Charakterizujte K-faktor a činitel harmonických ztrát.
3. Uveďte doporučení pro návrh nových transformátorů.
4. Uveďte zásady výpočtu snížení výkonu stávajících transformátorů.
5. Proveďte měření harmonických nesinusové zátěže a proveďte výpočet K-faktoru. Shrňte dosažené výsledky.



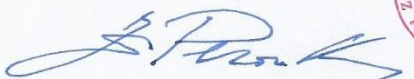
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

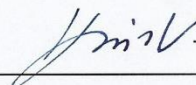
1. IEEE Std. C57.110-1998 IEEE Recommended practice for establishing transformer capability.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje vliv nelineární zátěže a výkonové elektroniky na chování a zejména ztráty různých druhů transformátorů. Stávající transformátory musejí pracovat s nižším zatížením než jmenovitým nebo nově navrhované transformátory musejí mít provedena vhodná opatření.

Klíčová slova

Transformátor, K – faktor, činitel harmonických ztrát, harmonické ztráty

Abstrakt

This thesis is about the influence of a nonlinear load and power electronic circuits on the operation of the different kind of transformer and mainly about their losses. Existing transformer must work with strain lower than rated strain in the comparison with new transformer, and the new transformer need to have appropriate measures.

Key words

Transformer, K – factor, harmonic loss factor, Harmonic losses

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.6.2020

Daniel Veselý

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Bohumilovi Skalovi Ph.D. za cenné připomínky a celkově metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval rodině za velkou psychickou podporu.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1. TEORIE TRANSFORMÁTORŮ.....	12
1.1 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU.....	12
1.1.1 Magnetický obvod.....	12
1.1.2 Elektrický obvod.....	13
1.1.3 Další rozptylové ztráty.....	13
1.1.4 Dielektrické ztráty.....	13
1.2 CHLAZENÍ.....	13
1.2.1 Suché transformátory.....	13
1.2.2 Olejové transformátory.....	13
2. ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU.....	14
2.1 ZTRÁTY PŘI LINEÁRNÍ ZÁTĚŽI.....	14
2.1.1 Ztráty v železe.....	14
2.1.2 Ztráty v mědi.....	16
2.1.3 Další rozptylové ztráty.....	16
2.1.4 Dielektrické ztráty.....	17
2.2 ZTRÁTY PŘI NELINEÁRNÍ ZÁTĚŽI.....	17
2.2.1 Ztráty v mědi.....	18
2.2.2 Ztráty v jádře.....	18
2.2.3 Další rozptylové ztráty.....	19
2.2.4 Výsledné ztráty.....	20
3. POPIS HARMONICKÝCH ZTRÁT.....	20
3.1 CELKOVÉ HARMONICKÉ ZTRÁTY (THD).....	20
3.2 ČINITEL HARMONICKÝCH ZTRÁT (FHL).....	21
3.2.1 Činitel harmonických ztrát vířivými proudy.....	21
3.2.2 Činitel harmonických ztrát pro další rozptylové ztráty.....	22
3.2.3 Činitel harmonických ztrát pro velmi vysoké frekvence.....	22
3.3 K – FAKTOR ^{[5][7]}	23
4. MĚŘENÍ A URČENÍ K – FAKTORU.....	25
5. DOPORUČENÍ PRO JIŽ STÁVAJÍCÍ A NOVÉ TRANSFORMÁTORY.....	30
5.1 DOPORUČENÍ PRO JIŽ EXISTUJÍCÍ SUCHÉ TRANSFORMÁTORY.....	30
5.2 DOPORUČENÍ PRO JIŽ EXISTUJÍCÍ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY.....	32
5.3 DOPORUČENÍ PRO VÝROBU NOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....	33
6. DALŠÍ INFORMACE O K-RATED TRANSFORMÁTORECH A JEJICH ALTERNATIVY [10].	35
6.1 ALTERNATIVY KE K – RATED TRANSFORMÁTORŮM.....	36
7. ZÁVĚR.....	37
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	39
PŘÍLOHY.....	41

Seznam symbolů a zkratk

F_r	Činitel harmonických ztrát pro další rozptylové ztráty
F_v	Činitel harmonických ztrát pro vířivé proudy
F_{v-vf}	Upravený činitel h. ztrát pro vířivé proudy ve vysokých frekvencích
I_h	Efektivní hodnota proudu při příslušném řádu harmonické (A)
I_{max-pu}	Celkové ztráty v poměrných veličinách
I_n	Jmenovitý proud (A)
I_r	Efektivní hodnota proudu při daném zatížení a dané frekvenci (A)
P_h	Hysterezní Ztráty (W)
P_L	Celkové ztráty (W)
P_r	Další rozptylové ztráty (W)
P_{rh}	Další rozptylové ztráty po zohlednění harmonických (W)
P_v	Vířivé ztráty (W)
P_{vh}	Celkové ztráty vířivými proudy po zohlednění harmonických (W)
S_s	Plocha křivky (m)
δ_r	Hloubka vniku při jmenovité frekvenci (mm)
ČSN	Česká technická norma
FHL	Činitel harmonických ztrát
h	Řád harmonické
HMT	Harmonic mitigation transformer
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
K	Činitek K (K – faktor, K – rating)
rms	Skutečná efektivní hodnota
THD	Celkové harmonické ztráty (Total Harmonic Distortion)
UPS	Zdroj nepřerušovaného napětí
B	Magnetická indukce (T)
H	Intenzita magnetického pole (A/m)
I	Proud (A)
P	Činné ztráty (W)
R	Odpor vedení (Ω)
V	Objem feromagnetika (m ³)
d	Tloušťka materiálu (m)
f	Frekvence (Hz)

k	Materiálová konstanta
pu	Značení poměrné veličiny
δ	Hloubka vniku (mm)
ζ	Rozměr vinutí vztažený na hloubku vniku
μ	Permeabilita (H/m)
ρ	Rezistivita ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou zapojení nelineárních zátěží na transformátory s různým typem chlazení. Nárůst používání různé elektroniky a dalších zařízení produkující velké množství harmonických proudů a napětí nyní způsobuje i překročení činitele harmonických ztrát 0,05 (pu), které norma IEEE Std C57.12.00 stanovuje jako běžné provozní podmínky. Nejpoužívanějšími nelineárními zdroji způsobující zvýšení počtu harmonických jsou například tiskárny, televize, lednice, UPS a v poslední době i rozšířené LED osvětlení. S příchodem spínaných zdrojů a výkonových polovodičů se tento problém ještě zhoršil.

Většina nelineárních zátěží začala být masivně rozšířena až počátkem tohoto století. Díky tomu, že například v distribuční soustavě je na jeden distribuční transformátor připojena velká spousta domácností a osob, jedná se o rozšířený komunitní problém. Zvýšený počet harmonických způsobuje proudový skin efekt ve vodičích a s tím i spojené zvýšení jejich odporu a vyšší ztráty transformátoru, zkrácení životnosti transformátoru a zhoršený účinek napěťové soustavy. Mohou také v některých případech poškodit jističe, pojistky a v měřících přístrojích způsobit chyby měření. Proto je nezbytné se tímto problémem zabývat a předejít případným škodám.

V důsledku toho byla vytvořena norma, která stanovuje takzvaný činitel K nebo jinými slovy K – faktor, jehož hodnota jednak popisuje, jak velké řády harmonických produkuje zátěž, a také schopnost transformátoru pracovat s nelineární zátěží a harmonickými proudy s tím spojenými. Hodnota K-1 značí zcela lineární zátěž (odporové topení, motory), čím vyšší je pak hodnota K, tím větší je pak vliv zátěže na tepelné ztráty transformátoru. Například indukční ohřevy a svářečky se pohybují kolem K-4, telekomunikační technika okolo K-13 a počítače, UPC a další spínané zdroje přibližně K-20.

Norma IEEE Std. C57.110-2018 popisuje návod, jak vypočítat schopnost transformátoru pracovat s nelineárními zátěžemi. Rozděluje, zda je transformátor chlazen

olejem či jen okolním vzduchem, a také zda se jedná o nový transformátor, anebo o již transformátor vyrobený, který nebyl původně navržen na průchod nelineárních proudů a napětí.

Nové transformátory, které jsou navrženy na napájení nelineárních zátěží způsobující znatelné harmonické proudy, by měly mít dané harmonické spektrum, ve kterém mohou pracovat. Pro transformátory je dána maximální úroveň proudu, která je ještě pro daný K – faktor únosná. Existují také doporučení, jak daný transformátor dimenzovat a provozovat.

Tato práce se zabývá popisem transformátorů, jejich ztrát a jejím následným porovnáním se ztrátami na nelineární zátěži. Další část popisuje různé způsoby vyjádření harmonických složek v signálu, a následně je aplikuje v praktickém měření – analýza signálu s obsahem vyšších harmonických řádů, a následné stanovení jeho činitele harmonických ztrát. Další část pak vyhodnocuje výsledek K – faktoru a uvádí doporučení pro stávající transformátory o snížení jejich výkonu pro danou zátěž. Uvádí také doporučení, jak dimenzovat a provozovat nové transformátory, které ještě nebyly vyrobeny. Poslední část je věnována obecně K – faktoru, K – rated transformátorům, jejich alternativám, celkovému zhodnocení výsledků a závěru.

1. TEORIE TRANSFORMÁTORŮ

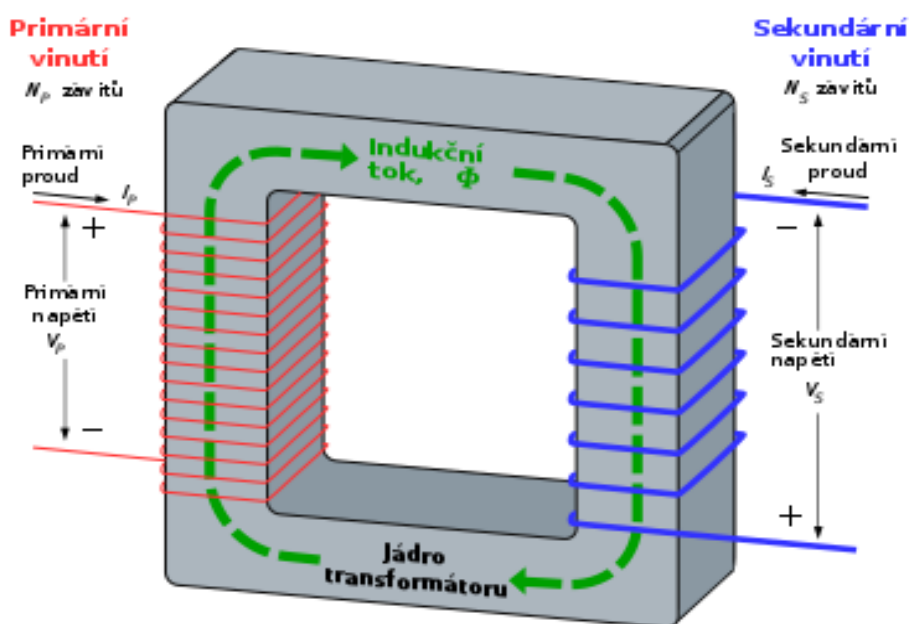
Transformátor je elektrické netočivé zařízení, které má za úkol převádět jednu střídavou napěťovou hladinu na jinou, a to za podmínky konstantního kmitočtu. Je nedílnou součástí celé elektrizační soustavy – od generátorů v elektrárnách po použití v běžných domácnostech pro napájení různých elektronických obvodů. Energie se přenáší mezi dvěma samostatnými cívkami, které nejsou vodivě propojeny, transformátor tedy také galvanicky odděluje dva samostatné obvody. Transformátory mohou být také použity jen na galvanické oddělení dvou střídavých obvodů za stejného napětí.

1.1 Konstrukce transformátoru

Samotné těleso transformátoru se nachází v transformátorové nádobě, v případě transformátoru chlazeného olejem je tato nádoba jím naplněna. Transformátor se skládá ze dvou základních obvodů: magnetický a elektrický.

1.1.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod transformátoru (jádro) je tvořen elektrotechnickými plechy, přes které se uzavírá magnetický obvod. Tyto plechy jsou na sebe vrstvené a vzájemně od sebe izolované. Jsou tvořené ze speciální oceli a obsahují příměsi křemíku, který zvýší jejich elektrický odpor a sníží ztráty. Plechy se vyrábějí v různých konstrukčních tvarech,



Obrázek 1.1: Řez transformátorem [1]

nejčastěji do písmena E nebo I. Ideální transformátor má plechy tvořené nekonečnou permeabilitou.

1.1.2 Elektrický obvod

Elektrický obvod transformátoru (vinutí) se nejčastěji skládá z izolovaných měděných vodičů, které jsou ovinuty na obou stranách magnetického obvodu a to tvoří tzv. primární a sekundární stranu transformátoru. Mezi jednotlivými je izolace ve formě laku, který je na vodiči. Od transformátorové nádoby je vinutí odizolováno. Množství závitů vinutí kolem sloupku jádra určuje transformátorový převod.

1.2 Chlazení

Během činnosti transformátoru vznikají tepelné (Joulovy) ztráty, které je třeba odvést. Dle typu chlazení se transformátory dělí na suché (vzduchové) a chlazené olejem. Suché transformátory se používají hlavně tam, kde existuje nebezpečí požáru, nebo se jedná o nebezpečné prostory. Jedná se například o budovy, průmyslové komplexy a další místa s větším výskytem lidí.

1.2.1 Suché transformátory

Suché transformátory nepoužívají kapalně chlazení, jako olejové. Transformátor se chladí jen okolním vzduchem, a díky tomu se toto chlazení používá jen u transformátorů do výkonu 1,5 MVA. Pokud transformátor má výkon vyšší, než 1,5 MVA, využívá se vynucené proudění vzduchu, a to pomocí ventilátorů. Po překročení určité povolené teploty se ventilátory automaticky zapnou a rozproudí do transformátoru studený vzduch. Tato metoda se dá použít do výkonu 15 MVA.

1.2.2 Olejové transformátory

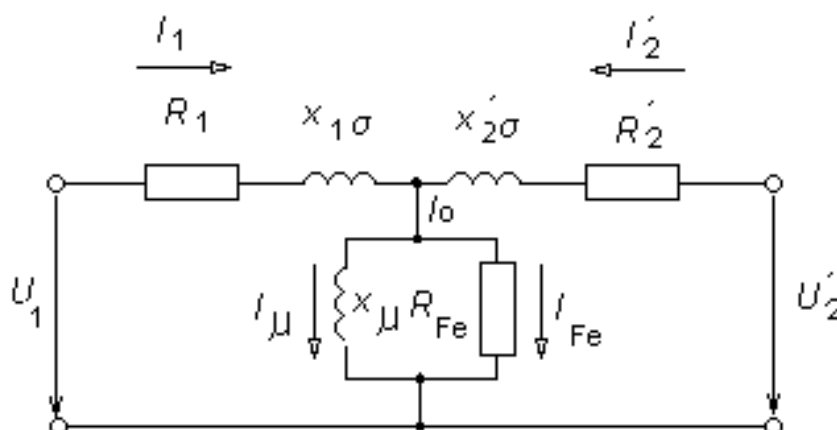
V transformátorech chlazených olejem se ztrátové teplo vyvinuté obvodem odvádí minerálním olejem. Díky závislosti měrné hmotnosti oleje na teplotě proudí ohřívající se olej kolem vinutí směrem vzhůru. Ve vnějších radiátorech nebo u stěny olejové nádoby se vlivem okolní teploty ochladí a je přiváděn opět k transformátoru a ochlazuje jej. Zvýšení účinnosti chlazení oleje je možné přidavnými ventilátory, nebo přidavným čerpadlem, kdy olej neproudí díky své konvekci, ale je hnán čerpadlem. V tomto případě je ještě nutná přítomnost tepelného výměníku, kde se chladí pomocí ventilátorů nebo vody. [13]

2. ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU

Ideální transformátor je představován jako lineární, bez ztrát a dokonale galvanicky oddělený. Jeho jádro a vinutí má nekonečnou magnetickou permeabilitu a nulový odpor vinutí. To ovšem u skutečného transformátoru neplatí, neboť v něm má vinutí nenulový odpor, je značná kapacita mezi jednotlivými závity a vrstvami, magnetické jádro není zcela lineární a nemá nekonečnou permeabilitu. Díky těmto vlastnostem vznikají v transformátoru různé ztráty.

2.1 Ztráty při lineární zátěži

Následující text se týká popisu ztrát, kdy jsou ztráty způsobené pouze 1. harmonickou procházejícího proudu. Při harmonické zátěži platí obecné náhradní schéma transformátoru (na obrázku 2.1), ze kterého jsou následně ztráty odvozeny. Ztráty se dělí na ztráty v železe (hysterezní nebo ztráty vířivými proudy), ztráty ve vinutí (Joulovy), přídatné (další rozptylové) a případně ještě ztráty dielektrické. [14]



Obrázek 2.1: Náhradní schéma transformátoru [2]

2.1.1 Ztráty v železe

Ztráty v železe jsou způsobeny střídavým tokem v jádru transformátoru. Ztráty v železe se dále dělí na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Celkové ztráty v železe jsou pak součtem obou zmíněných ztrát. Tyto ztráty jsou patrné hlavně v chodu transformátoru naprázdno, kdy na jeho sekundární straně není připojena žádná zátěž.

2.1.1.1. Ztráty hysterezní

Hysterezní ztráty (někdy též nazývané magnetické ztráty) jsou ztráty způsobené

vlastností feromagnetického materiálu. Pro magnetické materiály existuje diagram závislosti intenzity magnetického pole na magnetickou indukci, známý též jako hysterezní smyčka. Tyto ztráty jsou závislé na obsahu této smyčky a na frekvenci. Hysterezní smyčka se tvoří měřením tzv. cyklu magnetování, kdy se plynule mění intenzita magnetického pole od +H do -H a sleduje se právě výše zmíněná závislost na magnetické indukci. Čím je plocha uzavřené křivky menší, tím jsou i hysterezní ztráty menší. Hysterezní ztráty se dají vyjádřit následujícím vztahem:

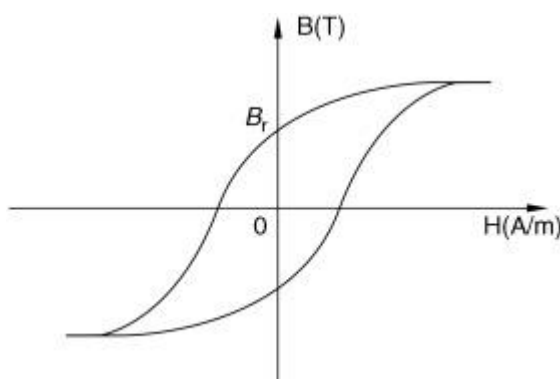
$$P_h = f \cdot S_s \cdot V \quad (2.2)$$

kde: P_h ... hysterezní ztráty (W)

f ... frekvence (Hz)

S_s ... plocha křivky (m)

V ... objem feromagnetika (m³)



Obrázek 2.3: Hysterezní křivka [3]

Samotné hysterezní ztráty transformátoru se dají změřit jen poměrně komplikovaně. Nelze je určit přímým měřením. Je třeba správně změřit hysterezní smyčku materiálu, ze které lze ztráty spočítat dle výše uvedeného vztahu (2.2) – jinými slovy, převést magnetické veličiny na elektrické. Hysterezní smyčku lze změřit s pomocí osciloskopu. Z dalších způsobů zjištění hysterezních ztrát existuje například experimentální Steitzmenovo metoda. Požadavkem na materiál jádra tedy je, aby měl hysterezní křivku co nejužší. Hysterezní ztráty také stoupají s frekvencí a druhou mocninou magnetické indukce B.[14] [15]

2.1.1.2 Ztráty vířivými proudy

Díky střídavému magnetickému toku vznikají díky Faradayova zákonu indukované proudy. Proud, který cirkuluje po dráze železného jádra, se nazývá vířivý proud. Tyto proudy jsou v obvodu neúčinné, a jedině, co způsobují v obvodu, jsou tepelné (Joulové)

ztráty. Pro omezení těchto neúčinných proudů je nutné změnit konstrukci samotného jádra. Kdyby jádro byl jen jednolitý kus železa, vířivé ztráty by byly obrovské, neboť vířivé ztráty závisí na druhé mocnině tloušťky materiálu. Teplo, které se vytvoří vlivem vířivých proudů je ekvivalentní vztahu (2.5), ovšem v tomto případě je R odporem materiálu, kterým se šíří vířivý proud. Jádro je tedy tvořeno trafoplechy, které mají malou tloušťku. Rozložení vířivých ztrát v materiálu lze zjistit pomocí numerických metod, nejčastěji 2-D metodou konečných prvků. Je také možné využít 3-D metodu konečných prvků pro zvýšení přesnosti, ale ve většině případů je mezi nimi minimální rozdíl. Tyto ztráty jsou dále závislé na mocnině frekvenci a mocnině magnetické indukce. Pro ztráty platí následující vztah: [8][14]

$$P_v = k \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot B_{ef}^2 \quad (2.4)$$

kde: P_v ... vířivé ztráty [W]
 k ... materiálová konstanta
 f ... frekvence [Hz]
 d ... tloušťka materiálu [m]
 B_{ef} ... efektivní hodnota magnetické indukce

2.1.2 Ztráty v mědi

Ztráty v mědi (Joulovy ztráty) způsobuje obecný ohmický odpor vinutí. Průchodem proudu ve vinutí a jeho odporu vzniká tzv. Joulovo teplo, což je tepelná energie, která otepluje vinutí transformátoru. Vzniká předáváním kinetické energie způsobující elektrický proud jiným částicím, které se vzniku elektrického proudu nezúčastňují. Tyto ztráty jsou dány tímto obecným vztahem:

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.5)$$

kde: P ... ztráty v mědi [W]
 R ... odpor vedení [Ω]
 I ... proud [A]

Joulovy ztráty jsou výrazné hlavně pokud je transformátor v režimu nakrátko, tj. sekundární strana transformátoru je spojena.

2.1.3 Další rozptylové ztráty

Další rozptylové ztráty (nebo také ztráty přídavné) jsou způsobeny rozptylem magnetického toku mimo jádro díky dalším kovovým konstrukčním částem transformátoru. Ve srovnání se ztrátami v železe a vinutí jsou v suchých transformátorech velmi malé, a lze je zanedbat, ovšem nezanedbatelný vliv mají v případě transformátoru chlazeným olejem, a

to hlavně při zapojené nelineární zátěži. Této části se věnuje bod 2.2.3 této práce. [7]

2.1.4 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty se v transformátoru vyskytují jen v izolačních materiálech v oleji nebo v okolních pevných izolacích. Zejména transformátorový olej může postupem času pozbývat své kvality, a díky tomu klesá jeho dielektrická pevnost či se mění jeho chemické vlastnosti. To vše přispívá ke zvýšení ztrát. Tyto ztráty jsou v této práci zanedbány. [14]

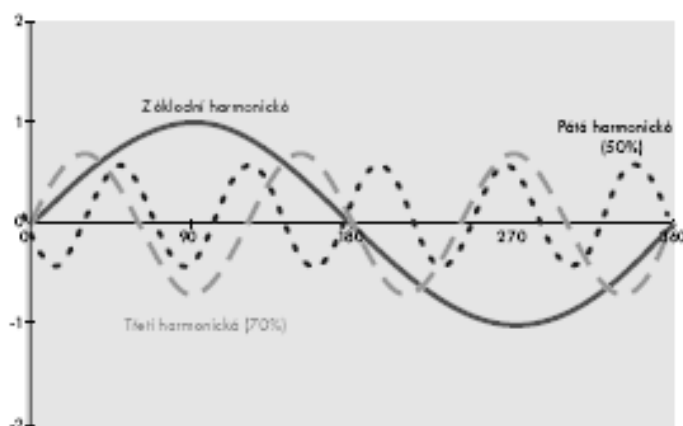
2.2 Ztráty při nelineární zátěži

Zatímco lineární zátěž je taková zátěž, která odebírá proud úměrně s připojeným napětím, u nelineární zátěži tomu tak není. I přes to, že napájecí napětí může mít dokonalý sinusový průběh bez žádného rušení, nelineární zátěž si stejně proud odebere nesinusovým způsobem. Zvláště ve výkonové elektronice je často proud odebírán v určitých „sekvencích“ nebo pulzech. To má za následek vzniku proudového signálu, který nemá čistě sinusový průběh. V průmyslových komplexech pak například není problém, aby neharmonické zatížení bylo i vyšší než 25%. Pro tyto komplexy jsou také problémem harmonické řady v násobku tři. Tyto řady harmonických mohou způsobovat poruchy připojených zařízení, která se mohou vypínat, vyřadit činnost jističů či v důsledku podpětí a nadproudu úplně zničit připojená zařízení. Vliv harmonických na domácí elektroniku má jiný charakter než na výše popsaný průmyslový komplex. Na rušení v signálu je citlivá hlavně elektronika a další zařízení. Připojení nelineární zátěže tak způsobí vznik vyšších harmonických napětí a proudů, které mohou mít negativní vliv na napájecí soustavu.

Harmonické napětí působí dle Faradayova zákona na magnetický tok v transformátoru. Tok je úměrný danému harmonickému napětí a nepřímo úměrný harmonickému řádu. Díky nízké impedanci většiny přenosových sítí je ale harmonické zkreslení napětí menší než 5 %, proto se při výpočtech většinou zanedbává.

Harmonické proudy mají oproti harmonickým napětím na transformátory větší negativní vliv. Způsobují nižší činný výkon, vyšší ztráty ve všech částech transformátoru a v jejich důsledcích také zvýšení tepla. Po připojení nelineární zátěže také přestává platit obecné náhradní schéma transformátoru, a v tomto důsledku i odvozené ztráty v bodě 2.1 této práce. Ztrátami po připojení nelineární zátěže se zabývá norma IEEE Std C57.110, jejíž poslední revize proběhla v roce 2018. Nelineární zátěži můžou být nejčastěji elektronické obvody – počítačové zdroje, telekomunikační technika, nepřerušitelné napěťové zdroje (UPS) nebo

spínané napájecí zdroje. [7]



Obrázek 2.6: Znázornění vyšších harmonických řádů [16]

2.2.1 Ztráty v mědi

Ztráty v mědi byly popsány vztahem (2.5). Vliv nelineární zátěže je patrný u proudu, který bude díky většímu počtu harmonických vyšší. Ztráty v mědi tak stoupají společně s druhou mocninou proudu. [7]

2.2.2 Ztráty v jádře

Ztrátami v jádře se rozumí ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. Ztráty vířivými proudy při nelineární zátěži jsou dle vztahu (2.4) úměrné mocnině proudu v zátěži a přibližně mocnině frekvence. Právě vířivé proudy nejvíce reagují na větší počet harmonických, a mohou za nepříznivých podmínek způsobovat největší oteplení v transformátoru. Ztráty vířivými proudy nejsou závislé na typu chlazení transformátoru. Zatímco v bodě (2.4) jsou ve ztrátách uvažovány jen ty, které byly způsobeny první harmonickou, při nelineární zátěži je nutné počítat i s popsáním skinefektem, který zde bude znatelnější. Navíc při vyšších harmonických může vznikat i stejnosměrná složka proudu, která dále zvýší jeho ztráty a nasycení magnetického jádra, které má potom za následek další zahřívání transformátoru a jeho hluchost. Z aplikace vztahu (2.4) lze celkové harmonické ztráty vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$P_{vh} = P_v \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 \cdot h^2 \quad (2.7)$$

kde: P_{vh} ... celkové ztráty vířivými proudy po zohlednění harmonických (W)

P_v ... ztráty vířivými proudy (bez vlivu vyšších harmonických) (W)

h ... řád harmonické

I_h ... efektivní hodnota proudu při příslušném řádu harmonické (A)

I ... efektivní hodnota proudu (A)

Vzhledem k tomu, že I reprezentuje ve vztahu (2.7) efektivní hodnotu proudu, lze za něj dosadit následující vztah:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (2.8)$$

Je také nutné počítat se skinefekttem způsobeným vysokými frekvencemi nemusí magnetický tok téct přímo středem železa. Závislost průniku do vodiče na frekvenci je zřejmá z následujícího vztahu: [7]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi fh}} = \frac{\delta_r}{\sqrt{h}} \quad (2.9)$$

kde: δ_r ... hloubka vniku při jmenovité frekvenci (mm)
 ρ ... rezistivita ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
 μ ... permeabilita (H/m)
 h ... řád harmonické
 f ... frekvence (Hz)

2.2.3 Další rozptylové ztráty

Rozptylové ztráty, které vznikají v jádře, na svorkách a dalších částech mají v normě název „Other stray losses“, volně přeloženo jako „Další rozptylové ztráty“, nebo také ztráty přídatné. Tyto ztráty jsou na rozdíl od ztrát v jádře závislé na typu chlazení transformátoru. Zatímco u suchých transformátorů nebude vyšší teplota způsobovat problémy v částech mimo vinutí, u transformátorů řízených olejem je nutné s nimi počítat, a to z toho důvodu, že vyšší teplota bude oteplovat izolační olej kolem sebe. Ztráty lze označit jako P_r .

$$P_{rh} = P_r \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_r}\right)^2 \cdot h^{0,8} \quad (2.10)$$

kde: P_{rh} ... celkové další rozptylové ztráty po zohlednění harmonických (W)
 P_r ... další rozptylové ztráty (bez vlivu vyšších harmonických) (W)
 h ... řád harmonické
 I_h ... efektivní hodnota proudu při příslušném řádu harmonické (A)
 I_r ... efektivní hodnota proudu při daném zatížení a dané frekvenci (A)

Ze vztahu je zřejmé, že exponent řádu harmonických není v tomto případě 2, ale 0,8. Dle výzkumu různých výrobců se další rozptylové ztráty zvětšují závisle na tomto exponentu. Proto i norma využívá ve výpočtech tento exponent. [7]

2.2.4 Výsledné ztráty

Výsledné ztráty jsou součtem všech třech předchozích ztrát. Dostáváme následující vztah:

$$P_L = P + P_v + P_r \quad (2.11)$$

kde: P_L ... celkové ztráty (W)
 P ... ztráty v mědi (W)
 P_v ... ztráty vířivými proudy (W)
 P_r ... další rozptylové ztráty (W)

Ztráty lze počítat i s poměrnými veličinami. V tom případě se vztah změní na:

$$P_L(pu) = 1 + P_v(pu) + P_r(pu) \quad (2.12)$$

kde proud se vztahuje na jmenovitý proud a ztráty se vztahují na ztráty v mědi při jmenovitém proudu. [7]

3. POPIS HARMONICKÝCH ZTRÁT

Norma IEEE Std C57.110-2018 popisuje způsob popisu harmonických ztrát pomocí činitele harmonických ztrát (FHL), ze kterého se dá následně vypočítat činitel K (K – faktor) transformátoru. Z dalších možností popisů harmonických ztrát existuje také například celkové harmonické zkreslení (THD). Mezi THD a FHL společně s K – faktorem není přímá vazba, naopak mezi K – faktorem a FHL existuje přímý vztah (3.11). Z tohoto důvodu také norma obsahuje různé varianty výpočtů pro FHL a K – faktor.

3.1 Celkové harmonické ztráty (THD)

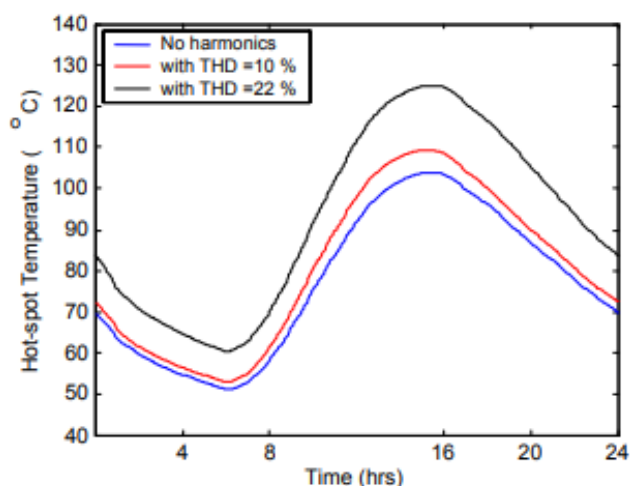
Celkové harmonické zkreslení vychází z anglického THD – „Total harmonic distortion“. Je to poměr mezi sumou všech harmonických výkonů a výkonem ze základní harmonické. Po vynásobení stem určuje i procentuální hodnotu. Vztah vypadá následovně:

$$THD = \frac{\sum_{h=2}^{h_{max}} P_h}{P_1} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

kde: THD ... činitel celkového harmonického zkreslení
 P_h ... ztráty v daném řádu harmonické (W)
 P_1 ... ztráty v první harmonické (W)

Ze vztahu vyplývá, že čím nižší bude součet harmonických ztrát v čitateli, tím více se bude blížit hodnota celého zlomku k nule, z čehož lze usuzovat, že čím menší THD je, tím věrnější a méně zkreslený signál je. Většina zařízení v síti dokáže pracovat s THD max 10 až 15 %. Nad touto hodnotou je signál tak nevěrohodný vůči svému původnímu, že připojené

transformátory budou produkovat více induktivních ztrát, což může vyústit v jejich úplné zničení nebo zkrácení životnosti. Proto je snaha držet THD na co nejnižších hodnotách. THD se také hojně využívá i u audiotechniky, kde značí věrnost reprodukce původního signálu. THD je zapsané v českých normách ČSN, která vychází z normy IEC. Rozdíl mezi nimi je, že norma IEC vztahuje celkový harmonický proud k celkové efektivní hodnotě proudu, zatímco ČSN jen k proudu v základní harmonické. THD se například u zesilovačů v audiotechnice může snížit snížením vnitřního zisku – zvýšení odporů rezistorů. Vliv THD na životnost transformátorů závisí na provozní teplotě transformátoru a kolísání teploty vlivem THD. Na následujícím obrázku je znázorněn transformátor chlazený olejem, a závislost teploty oleje na THD a jednotku času. [4] [9]



Obrázek 3.2: Závislost teploty na čase pro různé THD [4]

3.2. Činitel harmonických ztrát (FHL)

Činitel harmonických ztrát definuje číselnou hodnotu, ze které lze vyjádřit schopnost transformátoru napájet danou zátěž. Jeho výpočet se liší dle toho, zda se jedná o ztráty vířivými proudy, či další rozptylové ztráty. U dalších rozptylových ztrát dále záleží na tom, jaký způsob chlazení se u transformátoru využívá. [7]

3.2.1 Činitel harmonických ztrát vířivými proudy

Tento činitel vyjadřuje poměr mezi ztrátami vířivými proudy P_{vh} a P_v . Ztráty P_{vh} jsou popsány ve vztahu (2.7) této práce. Získáváme tím následující vztah:

$$F_v = \frac{P_{vh}}{P_v} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (3.3)$$

kde: F_v ... činitel harmonických ztrát pro vířivé proudy
 P_{vh} ... skutečné ztráty vířivými proudy (W)
 P_v ... ztráty vířivými proudy (W)
 I_h ... proud v daném řádu harmonické (A)
 h ... řád harmonické

Vztah (3.3) definuje hodnotu činitele harmonických ztrát ze skutečných efektivních hodnot proudů v jednotlivých řádech harmonických. Pokud ovšem harmonická analýza využívá hodnotu proudu vztaženou na celkový efektivní proud, lze tento vztah upravit následovně: [7]

$$F_v = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2} \quad (3.4)$$

kde poté: I ... celková efektivní hodnota proudu (A)

3.2.2 Činitel harmonických ztrát pro další rozptylové ztráty

Tento činitel má smysl počítat jen u olejově chlazených transformátorů, kde vzniklé teplo může nepříznivě působit na chladicí kapalinu transformátoru. Vztah je téměř analogický ke harmonickým ztrátám u vířivých proudů. Smysl exponentu nad řádem harmonické h byl vysvětlen v bodě 2.2.3 této práce. [7]

$$F_r = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2} \quad (3.5)$$

kde: F_r ... činitel harmonických ztrát pro další rozptylové ztráty

I_h ... proud v daném řádu harmonické (A)

h ... řád harmonické

I ... celková efektivní hodnota proudu (A)

3.2.3 Činitel harmonických ztrát pro velmi vysoké frekvence

Zvláštním případem je výpočet činitele harmonických ztrát pro velmi vysoké frekvence. Pro případ, že by byla frekvence tak velká, že by docházelo k silnému skin efektu a omezené hloubce vniku, je lepší počítat s tímto upraveným činitelem. Prvně je třeba počítat se vztahem (2.9), ze kterého vychází následující vztah: [7]

$$\zeta = \frac{d}{\delta} \quad (3.6)$$

kde: ζ ... rozměr vinutí vztažený na hloubku vniku

Vztah pro P_v vychází z (2.7) a (2.9):

$$P_{v-vf} = \frac{f^2 \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot B^2}{3 \cdot \rho} \cdot F(\zeta) = \frac{f^2 \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot B^2}{3 \cdot \rho} \cdot \frac{3 \cdot \sinh \zeta - \sin \zeta}{\zeta \cosh \zeta - \cos \zeta} \quad (3.7)$$

Dále je třeba stanovit funkci ζ v závislosti na daný řád harmonické:

$$\zeta_h = \frac{d}{\delta_r} = \zeta_r \sqrt{h} \quad (3.8)$$

Ve finále po konečných úpravách je již možné vše poskládat pro upravený činitel harmonických ztrát pro vířivé proudy během vysokých frekvencí:

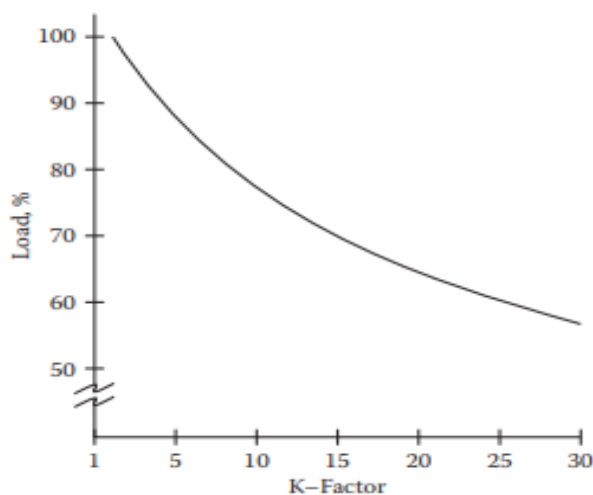
$$F_{v-vf} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \frac{F(\zeta_h)}{F(\zeta_R)} h^2 I_h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (3.9)$$

Pro představu – bude-li použit pro výpočet neupravený výraz i přes vysokou frekvenci, bude ve výsledku oproti upraveného vztahu rozdíl několik procent. Upravený vztah zajistí přesnější výpočet proudu, pro který je možno daný transformátor provozovat pro danou harmonickou konfiguraci.

3.3 K – faktor [5][7]

Zatímco činitel harmonických ztrát je funkcí harmonického proudu a není závislý na jeho relativní velikosti, K – faktor je definován jako hodnota, která udává zvýšení ztrát transformátoru díky nelineární zátěži, a je závislá jak na funkci na harmonického proudu, tak jeho velikosti. Primárně nevysvětluje harmonické zkreslení signálu, ale je-li jím transformátor označen, znázorňuje jeho schopnost vypořádání se s vyšším oteplením. Většinou se jedná o celé číslo, ale není to pravidlem. Určuje také, na kolik procent zátěže se může stávající transformátor provozovat při určité hodnotě K. Obecně lze konstatovat, že čím je zátěž více nelineární, a čím více obsahuje zátěžový proud harmonických složek, tím K – faktor vyšší. Například transformátor chlazený vzduchem, který je plně zatížený, produkuje při $K = 4$ o 10 % více tepla, než při $K = 1$. Na obrázku 3.4 je zobrazen graf napájení nepřerušitelného napájecího zdroje (UPS), ze kterého je zřetelné, že pokud by zátěž produkovala takové harmonické proudy rovné $K = 30$, transformátor by v poměru tepla pro $K = 1$ musel být zatížen o 40 % méně. K – faktor se rovná činitele harmonických ztrát jen za případu, kdy odmocnina součtu všech harmonických proudů v kvadrátu se rovná jmenovitému proudu na sekundární straně transformátoru. Certifikaci K – faktoru provádí v USA organizace UL LLC, známá dříve jako Underwriters Laboratories Inc. V Evropě se

častěji, než pouhé stanovení K – faktoru, využívá jeho následné využití k vypočítání proudového koeficientu, který po vynásobení s původním jmenovitým proudem určí maximální proud, který může být využit pro danou harmonickou konfiguraci. K tomu se váže bod 5.1 této práce. [5][7][10][11]



Obrázek 3.10: Závislost maximální zátěže na K faktoru. [5]

Mezi K – faktorem a činitelem harmonických ztrát platí následující vztah:

$$K = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{vh} \quad (3.11)$$

kde: K ... K – faktor

F_{vh} ... činitel harmonických ztrát pro vířivé proudy

I_h ... efektivní proud v daném řádu harmonické (A)

I_R ... efektivní proud v dané frekvenci a daném zatížení (A)

h ... řád harmonické

Obecně je K – faktor definován tímto vztahem:

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 = \frac{1}{I_R^2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 h^2 \quad (3.12)$$

Různá označení K – faktoru jsou v následující tabulce:

Typ zátěže	K – faktor
Svítilna se žárovými sv. zdroji	K-1
Odporové ohřivače	K-1
Motory, generátory	K-1
Výbojková svítilna	K-4
UPS se vstupním filtrem	K-4

Indukční ohřivače, PLC, svářečky	K-4
Telekomunikační technika	K-13
UPS bez vstupního filtru	K-13
Výkonné sálové PC	K-20
Polovodičové měniče	K-20
Budovy nemocnic	K-20
Průmyslový komplex	K-30
Velké kancelářské budovy	K-30
Další silně nelineární zátěže	až K-40

Tabulka 3.13: Různé typy zátěží a jejich K – faktory

4. MĚŘENÍ A URČENÍ K – FAKTORU

Určení K – faktoru bylo provedeno na transformátoru EXIMET – TRAF0 závod Jevišovice, 6300 VA, 380/42 V, 9,87/87A. Transformátor byl napájen frekvenčním měničem, na jehož výstupu byly proudové sondy s osciloskopem Tektronix TBS 2000 series. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 4.3. Celkem byly naměřeny 3 různé signály o třech různých hodnotách proudu. Každý signál obsahoval celkem 20 000 hodnot proudů. Výstupy z osciloskopu jsou v příloze této práce. Signály poté byly zpracovány ve výpočetním programu MATLAB, byla provedena rychlá Fourierova analýza (FFT) a následné grafické znázornění přítomnosti harmonických složek. Signály a jejich harmonické složky ukazují obrázky 4.3, 4.4 a 4.5. Graf harmonických je omezen jen na prvních 10 řádů. Z grafů je taky zřejmé, že vliv na proud má i stejnosměrná složka $h=0$ a $h=0,5$. Tyto dvě složky nejsou v normě uvažovány. Ve výpočtech jsou tedy uvažovány jen složky $h=1$ až $h=10$, další vyšší řády jsou zanedbány.

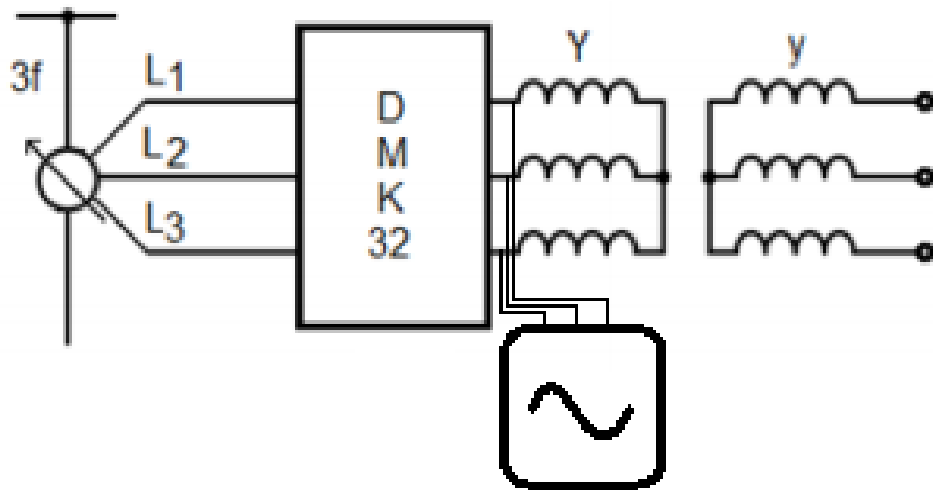
Dle vztahu (2.4) lze vypočítat vířivé ztráty. Pro materiálovou konstantu k platí následující vztah:

$$k = \frac{\frac{4}{3} \cdot V}{\rho} \quad (4.1)$$

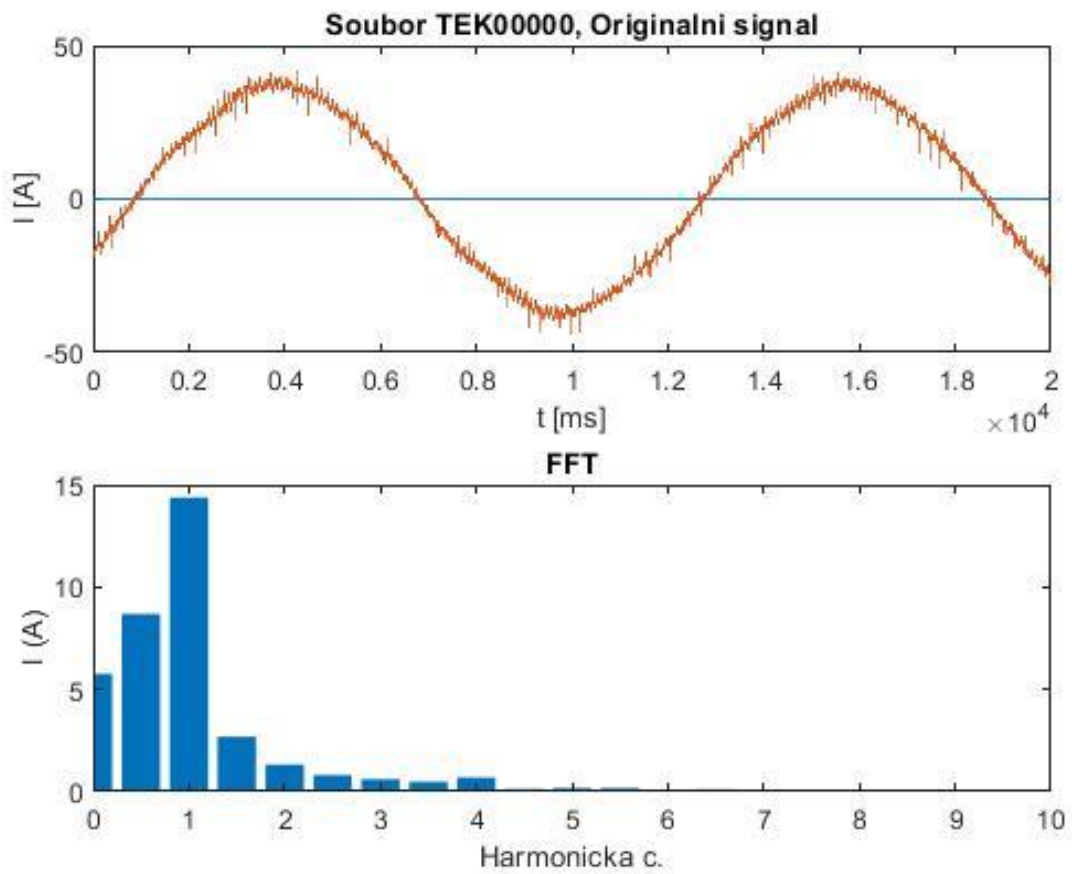
kde: k ... materiálová konstanta
 V ... objem feromagnetika (m^3)
 ρ ... rezistivita ($\Omega mm^2/m$)

Z datasheetu transformátoru platí: $V = 5,231 \cdot 10^{-3} m^3$ a $\rho = 4,6 \cdot 10^{-7} \Omega mm^2/m$. Po dosazení do vztahu 4.1 vzniká:

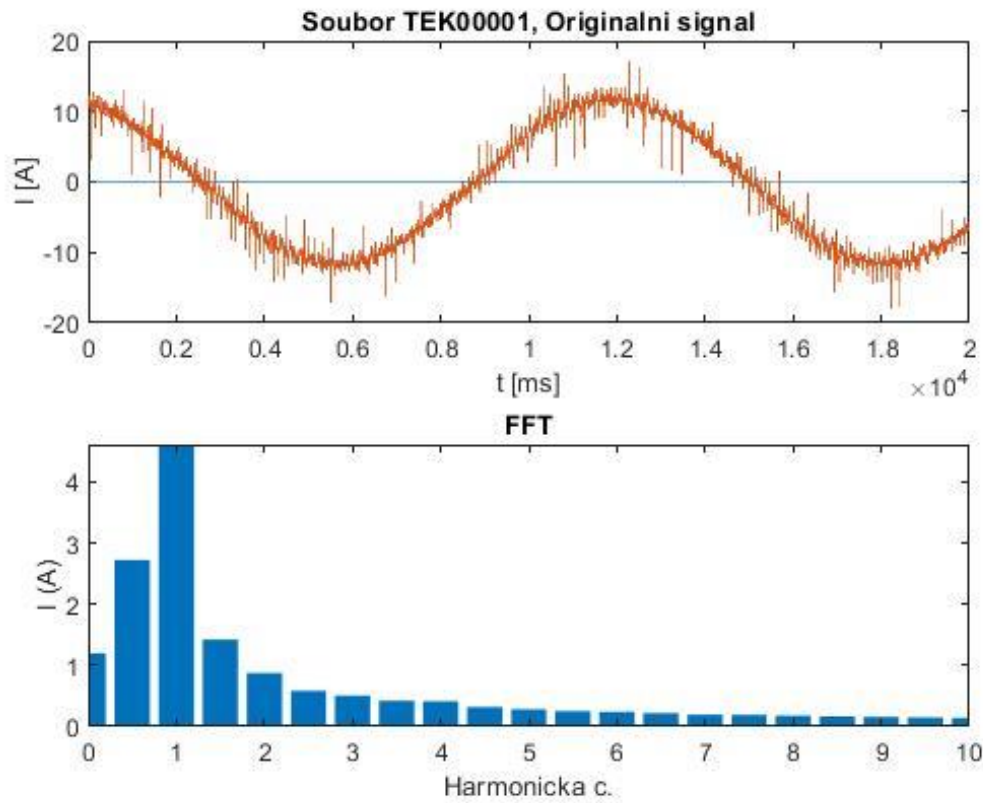
$$k = \frac{(4/3) \cdot 5,231 \cdot 10^{-3}}{4,6 \cdot 10^{-7}} = 0,151. \quad (4.2)$$



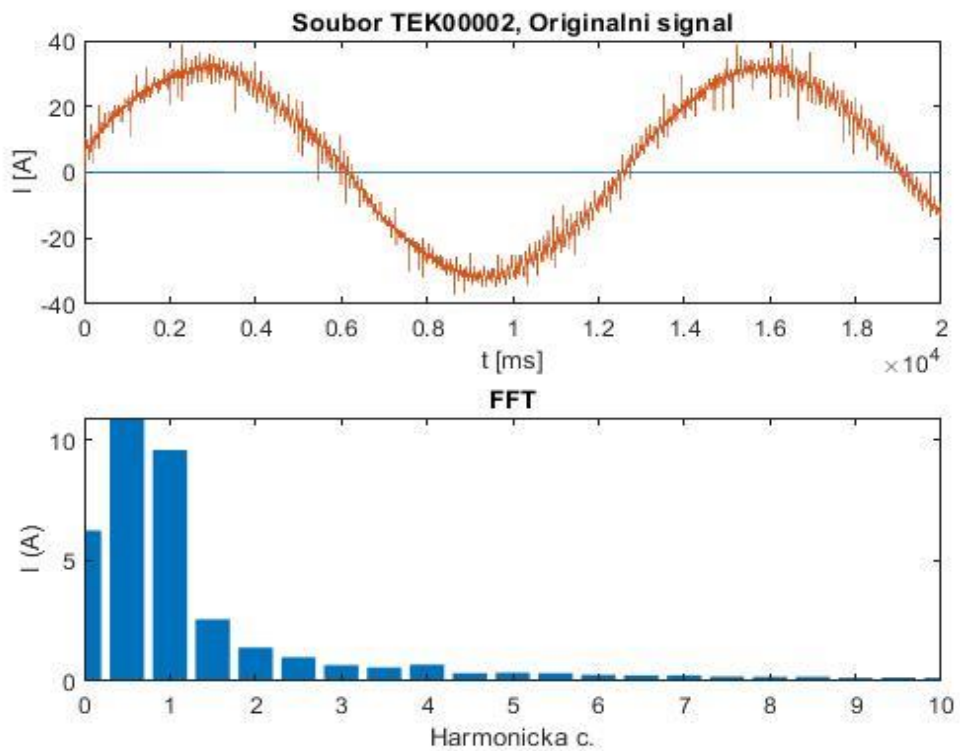
Obrázek 4.3 Schéma zapojení



Obrázek 4.4: TF = 0,5; Irms = 25,36 A, 8,5 kW



Obrázek 4.5: TF = 0,2; Irms = 8,2 A, 1 kW



Obrázek 4.6: TF = 0,4; Irms = 22,64 A, 6,4 kW

Vypočítanou konstantu k lze již dosadit do vztahu (2.3). Dále platí, že $d = 82 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ a $B_{max} = 1,1 \text{ T}$. Po dosazení všech hodnot do vztahu (2.3) jsou vypočítány ztráty vířivými proudy:

$$P_v = 0,151 \cdot 50^2 \cdot (82 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \frac{1,1^2}{2} = 1,401 \text{ W} . \quad (4.7)$$

Pro vzorový výpočet K faktoru byl zvolen signál TEK00000. Prvních 10 řádů harmonických má následující proud:

h	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
I_h [A]	14,37624	2,685521448	1,320697	0,8064073	0,601736738	0,484865632	0,689732	0,141473	0,177362
5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0,17850877	0,0611765	0,122112226	0,100815	0,1068835	0,107550555	0,108318521	0,070661	0,071928	0,073382

Tabulka 4.8: Proud v daných harmonických řádech.

Norma umožňuje kromě vztahu (3.3) vypočítat činitele harmonických ztrát, ve kterém je proud v daném řádu harmonické vztažen na proud v první harmonické. Výsledný upravený vztah vypadá následovně:

$$F_v = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (4.9)$$

kde: F_v ... činitel harmonických ztrát pro vířivé proudy
 I_h ... proud v daném řádu harmonické (A)
 I_1 ... proud v prvním řádu harmonické (A)
 h ... řád harmonické

Výsledné hodnoty plynoucí ze vztahů v sumě znázorňuje následující tabulka. Harmonické řády, které nebyly celým číslem, jsou zanedbány.

h	I_h [A]	I_h^2 [A]	h^2	I_h/I_1 [A]	$(I_h/I_1)^2$ [A]	$h^2 (I_h/I_1)^2$ [A]
1	14,37624	206,6762855	1	1	1	1
2	1,3206969	1,744240192	4	0,0918666	0,008439479	0,033757918
3	0,6017367	0,362087101	9	0,0418563	0,001751953	0,015767576
4	0,6897324	0,475730822	16	0,0479772	0,002301816	0,036829061
5	0,1773618	0,031457222	25	0,0123372	0,000152205	0,003805132
6	0,0611765	0,003742563	36	0,0042554	1,81083E-05	0,0006519
7	0,1008146	0,010163577	49	0,0070126	4,91763E-05	0,002409639
8	0,1075506	0,011567122	64	0,0074811	5,59673E-05	0,00358191
9	0,0706612	0,004993011	81	0,0049151	2,41586E-05	0,001956847
10	0,0733822	0,005384951	100	0,0051044	2,6055E-05	0,0026055
Σ		209,3256521			1,01281892	1,101365483

Tabulka 4.10: Výpočty pro TEK00000

Po dosazení do vztahu (4.9) je vypočítán činitel harmonických ztrát: [7]

$$F_v = \frac{1,101}{1,012} = 1,087 \quad (4.11)$$

Z činitele harmonických ztrát lze vypočítat K – faktor pomocí vztahu (3.11) následovně:

$$K = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_v = \left[\frac{209,325}{25,36^2} \right] 1,087 = 0,353 \quad (4.12)$$

Dle výpočtu byl tedy K – faktor stanoven na hodnotu 0,353. To značí, že transformátor nebyl příliš harmonicky zatížen, a zátěž řadí mezi motory a lineární svítidla. Obdobně jsou zde vypočítány K – faktory pro signály TEK00001 a TEK00002, s využitím vztahů 4.11 a 4.12.

h	I_h [A]	I_h^2 [A]	h^2	I_h/I [A]	$(I_h/I)^2$ [A]	$h^2 (I_h/I)^2$ [A]
1	4,61068424	21,258409	1	1	1	1
2	0,876205168	0,7677355	4	0,190038	0,036114438	0,144457752
3	0,504348612	0,2543675	9	0,1093869	0,011965501	0,107689512
4	0,414048488	0,1714362	16	0,089802	0,008064392	0,129030276
5	0,284008058	0,0806606	25	0,0615978	0,00379429	0,094857259
6	0,239756141	0,057483	36	0,0520001	0,002704013	0,097344455
7	0,196371009	0,0385616	49	0,0425904	0,001813944	0,088883277
8	0,17702297	0,0313371	64	0,0383941	0,001474105	0,094342734
9	0,157962273	0,0249521	81	0,0342601	0,001173751	0,095073833
10	0,139605986	0,0194898	100	0,0302788	0,000916806	0,091680573
Σ		22,704433			1,068021241	1,943359672

Tabulka 4.13: Výpočty pro TEK00001

$$F_v = \frac{1,943}{1,068} = 1,819 \quad (4.14)$$

$$K = \left[\frac{22,704}{8,2^2} \right] 1,819 = 0,614 \quad (4.15)$$

h	I_h [A]	I_h^2 [A]	h^2	I_h/I [A]	$(I_h/I)^2$ [A]	$h^2 (I_h/I)^2$ [A]
1	9,59030276	91,973907	1	0,999999996	1	1
2	1,39635078	1,9497955	4	0,145600281	0,021199442	0,084797767
3	0,67257565	0,452358	9	0,070130804	0,00491833	0,044264967
4	0,69215459	0,4790779	16	0,07217234	0,005208847	0,083341546
5	0,35121287	0,1233504	25	0,036621666	0,001341146	0,03352866
6	0,26504897	0,0702509	36	0,027637185	0,000763814	0,027497303
7	0,24198268	0,0585556	49	0,02523201	0,000636655	0,03119608
8	0,1856011	0,0344477	64	0,01935299	0,000374538	0,023970463
9	0,14278757	0,0203882	81	0,01488874	0,000221675	0,017955651
10	0,15115596	0,0228481	100	0,01576133	0,00024842	0,024841962
SOUČET		95,184979			1,034912866	1,371394399

Tabulka 4.16: Výpočty pro TEK00002

$$F_v = \frac{1,371}{1,034} = 1,325 \quad (4.17)$$

$$K = \left[\frac{95,184}{22,64^2} \right] 1,325 = 0,246 \quad (4.18)$$

5. DOPORUČENÍ PRO JIŽ STÁVAJÍCÍ A NOVÉ TRANSFORMÁTORY

Tato část práce se dělí na dvě podkapitoly, a to z toho důvodu, zatímco nové transformátory lze přesně vyrobit a dimenzovat na určitou neharmonickou zátěž a udělit mu K – faktor, v již vyrobených transformátech není známo, jak se budou na dané nelineární zátěži chovat. Proto existuje postup pro výpočet maximálního proudu, na kterém lze provozovat již vyrobené transformátory po připojení dané zátěže. Postupy se liší v typu chlazení transformátoru, kde u suchých transformátorů se nemusí kalkulovat s přidavnými ztrátami, u transformátorů chlazených kapalinou se tato veličina musí připočítat k celkovým sledovaným ztrátám. Dle normy ale není nutné, aby již stávající transformátory museli projít certifikací na určení svého K – faktoru, který by transformátor zvládal.

5.1 Doporučení pro již existující suché transformátory

Velké harmonické zatížení sníží jmenovitý proud, pro který je možno transformátor provozovat. Poměrná hodnota maximálního proudu při daném proudovém zatížení je dán vztahem (5.1). Tento proud sice pro dané harmonické zatížení může být překročen, lze však očekávat snížení životnosti transformátoru vlivem teplotního namáhání materiálů v něm obsažených. [7]

$$I_{max-pu} = \sqrt{\frac{P_{L-pu}}{1+F_v \cdot P_{v-pu}}} \quad (5.1)$$

kde: P_{L-pu} ... celkové ztráty v poměrných veličinách
 P_{v-pu} ... ztráty vířivými proudy v poměrných veličinách
 F_H ... činitel harmonických ztrát
 I_{max-pu} ... maximální proud pro danou zátěž v poměrných veličinách

Z tohoto vztahu vyplývá, že násobný koeficient proudu je závislý na celkových ztrátách a na ztrátách vířivými proudy. Právě vířivé proudy mají největší vliv na K – faktor a nežádoucí oteplování transformátoru při nelineární zátěži. Přídavné ztráty pro suché transformátory P_r

jsou rovny nule. Pro výpočet ztrát do vztahu (5.1) lze využít vztah (2.7), který definoval ztráty v poměrných veličinách. Ztráty byly vztaženy na celkové ztráty v mědi. Pro připomenutí:

$$P_L(pu) = 1 + P_v(pu) + P_r(pu) \quad (2.12)$$

Se znalostí ztrát vířivými proudy a celkového proudu vztaženého na první harmonickou lze použít následující vztah:

$$P_L(pu) = I^2(pu) \cdot (1 + F_H \cdot P_v(pu)) \quad (5.2)$$

V našem případě jsou celkové ztráty $P_L = 119 \text{ W}$. Tyto ztráty byly určeny měřením na transformátoru. Pro vířivé proudy uvažujeme nejhorší možnou hodnotu určenou metodou odhadu, a stanovme ji na $P_v = 40 \text{ W}$. V tomto případě P_v mají v celkových ztrátách podíl 33,61 %. F_H bylo získáno ve vztahu (4.11). Dosazení do vztahu (5.1) pro harmonickou konfiguraci z TEK00000 vypadá následovně:

$$I_{max-pu} = \sqrt{\frac{1,3361}{1+1,08 \cdot 0,3361}} = 0,990 \quad (5.3)$$

Z jmenovitých hodnot transformátoru je znám proud $I_n = 9,87 \text{ A}$ proudící na primární straně transformátoru. Skutečný proud, pro který může být transformátor při dané harmonické konfiguraci a vířivých ztrátách provozován, se vypočítá následovně:

$$I_{max} = I_n \cdot I_{max-pu} = 0,990 \cdot 9,87 = 9,77 \text{ A} \quad (5.4)$$

kde: I_{max} ... celkové ztráty v poměrných veličinách
 P_{v-PU} ... ztráty vířivými proudy v poměrných veličinách
 F_H ... činitel harmonických ztrát
 I_{max-pu} ... maximální proud pro danou zátěž v poměrných veličinách

Z výsledků je zřejmé, že maximální proud je o 1,01 % nižší než proud jmenovitý. Rozdíl není příliš velký, neboť i činitel harmonického zkreslení F_H je také malý. Obdobně lze vypočítat maximální proud pro další naměřené signály. Hodnoty F_H vychází z předchozích výpočtů (4.15) a (4.18).

Pro TEK00001 je výpočet následující:

$$I_{max-pu} = \sqrt{\frac{1,3361}{1+1,819 \cdot 0,3361}} = 0,91 \quad (5.5)$$

$$I_{max} = I_n \cdot I_{max-pu} = 0,91 \cdot 9,87 = 8,98 \text{ A} \quad (5.6)$$

Pro TEK00002:

$$I_{max-pu} = \sqrt{\frac{1,3361}{1+1,325 \cdot 0,3361}} = 0,961 \quad (5.7)$$

$$I_{max} = I_n \cdot I_{max-pu} = 0,961 \cdot 9,87 = 9,48 \text{ A} \quad (5.8)$$

Je tedy zřejmé, že pro TEK00001 je nutné dle normy transformátor provozovat na cca 91 % jmenovitého proudu a pro TEK00002 je nutné transformátor provozovat na 96 % jmenovitého proudu na primární straně. Pokud by byl transformátor provozován trvale na vyšší proud, než I_{max} , hrozilo by jeho zkrácení životnosti vlivem vzniklého tepla.



Obrázek 5.9: Měřený transformátor

5.2 Doporučení pro již existující olejové transformátory

U olejových transformátorů je do předchozích výpočtů nutno zahrnout i přídavné ztráty P_r , které v předchozím případě u suchého transformátoru byly rovny nule, jinak se

zde výpočet od výpočtu u suchého transformátoru neliší. Vliv přídavných ztrát byl popsán v kapitole 2.2.3 této práce. Určuje se zde ale také nejvyšší oteplení chladícího oleje oproti svému okolí. Výpočty jsou zde poté složitější než u doporučení pro suché transformátory. Do výpočtů se dále musí brát v potaz nárůst teploty transformátoru nad teplotu okolí, ztráty naprázdno a nejvyšší nárůst teploty vinutí nad teplotu chladící kapaliny. Aby se mohlo určit nejteplejší místo na transformátoru, je nutné nejdříve nutně znát průměrné teploty za normálního provozu pro daný jmenovitý proud s danou harmonickou konfigurací. Po instalaci transformátoru je změřeno harmonické spektrum a s ním i spojené harmonické proudy. Tyto hodnoty se poté zašlou výrobcí transformátoru, který určí maximální oteplení transformátoru. Ze všech těchto dat lze poté určit největší nárůst oteplení kapaliny transformátoru vůči svému okolí a také nárůst největší teploty ve vinutí. Tyto hodnoty se poté sčítají. [7]

5.3 Doporučení pro výrobu nových transformátorů

Jak bylo řečeno v úvodu této práce, vzhledem k výraznému nárůstu nelineárních zátěží v elektrizační soustavě je nutné, aby zejména distribuční transformátory, které jsou často chlazené olejem, byly připraveny na případné zvýšení harmonických proudů v síti a tím způsobené oteplení a snížení životnosti. Existuje několik doporučení: [7]

- Použití filtru na sekundární straně obvodu. Nové transformátory by měly mít na své sekundární straně filtr, který by vyšší harmonické řady vyrušil. Je zde ale třeba dávat pozor na to, že se harmonické složky mohou přiblížit k rezonanční frekvenci daného zapojení filtru. Tím by se jeho reaktance pro danou harmonickou vyrovnaly, filtr by byl neúčinný pro daný řád harmonické neúčinný, a v transformátoru by se mohly navýšit vířivé ztráty a vnikat nepříznivá oteplení. To ostatně platí i pro kompenzaci účinníku, kde amplituda proudu díky rezonanci může transformátor a jeho části poškodit. Dále díky tomu, že je v obvodu snižována indukčnost, mohou být v obvodu další řady harmonických proudů. Vzniklé ztráty přitom poté mají na transformátor ekonomický vliv ve formě zvýšení provozních nákladů. Proto je tedy třeba najít kompromis mezi zlepšením účinníku zátěže a požadavcích na výkon transformátoru.
- Správné dimenzování nulového vodiče. Nulový vodič transformátoru zapojeného do hvězdy by měl mít alespoň dvojnásobně větší průřez než fázové vodiče, neboť pokud zátěž generuje harmonické proudy v řádech násobků tří, může jím protékat v proudové nule až 100 % zátěžového proudu, a hrozilo by jeho výrazné zahřátí a následné vyhoření.

- Stínění elektrostatického pole. Díky uzemnění primární a sekundární straně na různých potenciálech vzniká mezi vinutími určitá kapacita. Bude-li toto pole odstíněno, kapacita mezi vinutími se ponížší. Toto řešení ale ponížší harmonické proudy jen málo. Důležitým problémem pro použití stínění je také fakt, že díky vzájemnému magnetickému poli obou stínění se mohou harmonické ztráty dále navyšovat, což je nežádoucí. Použití uzemnění a stínění elektrického pole má také pozitivní vliv na sekundární stranu transformátoru, kde transformátor chrání před přechodovými stavy a napět'ovými rázy na vedení.
- Správné navržení konstrukčních částí transformátoru. Harmonické proudy mohou zvláště v olejově chlazených transformátorech zvyšovat přídavné ztráty transformátoru. Doporučuje se používat nemagnetické materiály místo oceli, používat odstínění, a přerušeni případných proudových cest.
- Výroba transformátoru na míru dané harmonické konfiguraci. Pokud předem známa harmonická konfigurace zátěže, může výrobce správně navrhnout transformátor, který harmonickému zatížení odolá. Měl by také být předem určen přibližný činitel harmonických ztrát společně s údaji, zda byl tento činitel měřen na primární či sekundární straně transformátoru, a také jmenovitá frekvence. Dle normy musí tyto údaje výrobce vědět předem, neboť mu není a nemůže být známa harmonická konfigurace zátěže, kde transformátor bude zapojen.
- Správně navržené vinutí. Jak již bylo v této práci několikrát zmíněno, ztráty vířivými proudy jsou silně ovlivněny neharmonickými proudy. Výrobce by měl pro každé vinutí definovat tyto ztráty pomocí vztahu (5.2). Pro to by měli být známy činitele harmonických ztrát na obou stranách transformátoru, neboť i na straně nižšího napětí může docházet k tomu, že se jeho teplota zvýší na vyšší hodnotu, než bude strana vyššího napětí. Není tedy pravidlem, že strana transformátoru s nižším napětím bude mít menší teplotu než strana s vyšším napětím.
- I přes výrobu transformátoru na přesnou harmonickou konfiguraci norma stanovuje, že by K – rated transformátory neměly být používány na zátěže, kde jakýkoliv proud v harmonickém řádu vyšší než 10 je vyšší než převrácená hodnota daného harmonického řádu pro základní proud. [7][11]

Všechny výše popsané body prakticky míří k hlavnímu doporučení, a to tak, aby nové transformátory měli vinutí navržené na zvýšení teploty vlivem harmonických ztrát. Výrobce může také přesně specifikovat ztráty vířivými proudy v daných vinutích při dané frekvenci a proudu. To vše vede k výpočtu celkových ztrát, který byl znázorněn ve vztahu (5.2).

6. DALŠÍ INFORMACE O K-RATED TRANSFORMÁTORECH A JEJICH ALTERNATIVY [10]

K – faktor vznikl kolem roku 1980, jako reakce na první popis vyšších harmonických a jejich vlivů na transformátor. V současné době se hlavně vyrábí transformátory s $K = 4, 9, 13, 20$. Transformátory s vyšším K se používají jen velmi výjimečně, jejich výroba je složitá a velmi nákladná. Nejvyšší K – faktor je roven 50.

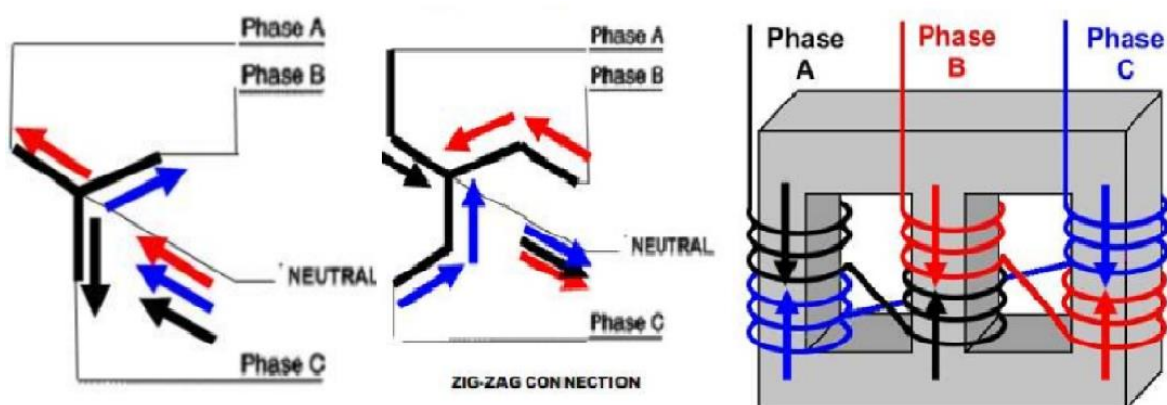
Distribuční transformátory mají za úkol finální transformaci napětí, než se finálně dostane do domácností. Proto je velice důležité jejich správné navržení, a díky tomu některé společnosti doporučují i po instalaci transformátoru průběžné měření a vyhodnocování výskytu harmonických řádů v transformátoru a jeho teplotní ztráty. Díky tomu se může předejít případným poruchám, které mohou mít fatální následky. Pro omezení harmonických řádů se také doporučuje, aby například v kancelářských budovách byla veškerá elektronika a počítače zapojeny paralelně. K – faktor celkové zátěže pak bude nižší, než kdyby se měřil na jednotlivé zátěži zvlášť, či v sérii. Výrobci také k jednotlivým K – faktorům dávají následující popis:

- $K = 1$. Transformátor je určen je na lineární zátěž typu motory, generátory, světelná technika. Je navržen tak, aby mohl pracovat jen se ztrátami které způsobuje jmenovitá frekvence – tedy vířivé ztráty a další. V případě nelinearity na zátěži vznikají nepřijatelné tepelné ztráty a opotřebování částí transformátoru.
- $K = 4$. Tento transformátor je schopen pracovat i s vyššími řády harmonické bez zahříváním – se třetím řádem harmonické max 16 % jmenovitého proudu, se sedmým řádem max 7 %, s devátým řádem max 5,5 a dále s menšími procenty až do 25. řádu harmonické.
- $K = 9$. Tento transformátor dokáže pracovat s harmonickou zátěží větší o více než 160 % transformátoru s $K = 4$.
- $K = 13$. Transformátor dokáže pracovat s harmonickým zatížením o 200% vyšším než u $K = 4$.
- $K = 20$ a více: Tyto transformátory se vzhledem k ceně příliš nevyrábí. Jsou určeny pro ještě vyšší řády harmonických než v předchozích případech. Využití mají zejména v kritických infrastrukturách – nemocnice a další. ^[11]

Vliv K – faktoru má také na váhu transformátoru. Uvažujeme-li transformátory firmy Schneider s 300 kVA a $K = 9$, bude stejný transformátor s $K = 13$ o 57% těžší.

6.1 Alternativy ke K – rated transformátorům

K alternativě K – rated transformátorů patří například transformátor zmírňující harmonické – Harmonic mitigating transformer (HMT). Oproti K – rated transformátoru, které jsou dimenzovány na vyšší harmonické proudy a napětí, HMT transformátor přímo harmonické složky snižuje, a to hlavně harmonické řády v násobcích tří v případě 1fázových transformátorů a u 3fázových řády harmonické 5,7,11 a více. Využívá nízké impedance zdroje, fázového posuvu a přerušování magnetického toku k tomu, aby snížil harmonické. Na obrázku (6.1) je v první části znázorněn tok proudu nulovým vodičem při zapojení do trojúhelníku v obyčejném transformátoru. V další části je již HMT transformátor a připojení do lomené hvězdy – proud nulovým vodičem teče naopak, čemuž vypomohla změna magnetického toku. Je-li obyčejný transformátor v zapojení D-y, jsou násobky třetí harmonické svedeny ze strany trojúhelníka na stranu hvězdy, kde mohou cirkulovat dokola a způsobovat další ztráty transformátoru. HMT transformátory ovšem obsahují další přídavné vinutí, které ve 3fázovém systému vyruší harmonické složky přicházející z ostatních dvou vinutí. Využívá přitom také fázového posuvu mezi fázemi na sekundáru, a to tak, aby fáze byla otočena o téměř 180° než je fáze s vyšší harmonickou, čímž se vzájemně vyruší. Vyšší harmonické proudy jsou tímto eliminovány. Třetí část obrázku znázorňuje sloupky třífázového HMT transformátoru s navinutým vinutím kolem nich. [6][12]



Obrázek 6.1: HMT transformátor [6]

Používání HMT transformátorů je výhodné z hlediska úspory energie, a také díky jeho schopnostem – dokáže vyvážit fázová napětí a proudy na primární straně transformátoru, oproti klasickému transformátoru nemá takový hluk a je bezpečnější z hlediska v provozu díky tomu, že se jeho části při provozu tolik neoteplují. Používají se nejčastěji

v průmyslových komplexech. Nevýhodou HMT transformátorů je jejich cena, ovšem díky úspoře energie díky neuskutečněným ztrátám může po pár letech provozu dojít k vyrovnání těchto ekonomických ztrát. ^[12]

Další možností je využití Harmonicky snižovacího UPS – „Harmonic mitigation UPS“, které působí jako aktivní filtr. Do sítě pouští jen proud, který se rovná své původní podobě. UPS se ale nevyužívá místo distribučních transformátorů, ale spíše jako napájení datacenter a sálových počítačů, které produkují velké množství vyšších řádů harmonických, a výpadky proudů jsou zde nepřijatelné. Z dalších doporučení snížení vyšších harmonických lze jmenovat například použití různých reaktorů a tlumivek, používání pasivních či aktivních filtrů, použití 12. pulzních měničů nebo přímo používání pohonů negenerující vysoké harmonické řády. [6]

7. ZÁVĚR

K-rated transformátory se staly součástí elektrizační soustavy i v budoucnu se předpokládá, že transformátory se budou muset vyrovnávat se stále vyššími nároky ve formě nelineárních zátěží. Nejvyšší vliv na ztráty transformátoru při nelineární zátěži mají vířivé proudy, a proto je nutné nové transformátory patřičně dimenzovat. Ztráty při nelineární zátěži záleží ale také na typu chlazení transformátoru, pokud je transformátor chlazen olejem, mají nejvyšší vliv na oteplení ztráty přídavné.

Pro popis harmonických ztrát se využívá nejčastěji tří různých způsobů: THD, FHL a K – faktor. Zatímco v evropských normách se spíše vypočítává ponížení proudu, které je třeba na transformátoru aplikovat, aby mohl napájet danou zátěž, v USA se častěji stanovuje přímo K – faktor. O THD se norma nevyjadřuje, neboť mezní ní není přímý vztah jako u FHL a K – faktoru. Pro účely stanovení FHL a následně K – faktoru byly naměřeny tři různé signály na výstupu frekvenčního měniče, ze kterých byla provedena rychlá Fourierova analýza ve výpočetním programu MATLAB, kde byl také vytvořen sloupcový graf s hodnotami jednotlivých proudů v daných harmonických řádech. Z grafů se zdá, že největší harmonické znečištění má signál TEK00001, což potvrzuje i výpočet činitele harmonických ztrát, který byl pro tento signál 1,819. Pro TEK00000 byl tento činitel stanoven na hodnotu 1,087 a pro TEK00002 1,325. Z těchto dat byl následně určen K – faktor; pro TEK00000 činí 0,353, pro TEK00001 činí 0,61 a pro TEK00002 0,246. Hodnoty jsou velmi malé, neboť harmonické zkreslení nebylo tak výrazné, jak by se mohlo na první pohled zdát, a odpovídají napájení motoru, lineárních svítidel či odporovým ohřívacům. Z těchto výsledků byl

následně určen maximální proud, na který by případně musel být transformátor snižen, aby mohl danou zátěž napájet, aniž by vznikalo nebezpečné oteplení části transformátoru a jeho částí. Byly odhadnuty a uvažovány nejhorší možné podmínky, a to takové, že ztráty vířivými proudy by měli na celkových ztrátách podíl více než 33 %. Dle výpočtů by pro TEK00000 výsledný proud na primární straně transformátoru musel být snižen o necelé 1 %, pro TEK00002 o 9 % a pro TEK00002 o 6 %. Pokud by byla napájena více nelineární zátěž vytvářející další řady harmonických, byly by hodnoty mnohem vyšší. Pokud by měřený transformátor byl chlazen olejem, bylo by nutné připočítat i přídavné ztráty.

Tyto praktické výpočty by se měli aplikovat na jakýkoliv stávající transformátor, pokud by měl napájet neharmonickou zátěž, případně zjistit harmonické rušení u již stávajících distribučních transformátorů a zauvažovat o jejich případné výměně. U nových transformátorů norma uvádí různá doporučení, jak snížit harmonické ztráty na minimum a snížit tak nežádoucí oteplení různých částí transformátoru, které by mělo za následek zkrácení jeho životnosti a vyřazení ho z provozu. Kromě používání filtru na sekundární straně transformátoru se jedná například o zvýšení průřezu nulového vodiče, stínění elektrostatického pole v uzemnění transformátorů, správné dimenzování jádra a vinutí transformátoru a jejich výroba na míru dané harmonické konfiguraci.



Obrázek 7.1: Různé podoby K – rated transformátorů

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] AUTOR NEZNÁMÝ. *Wikipedia* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0b/Transformer3d_col3_cs.svg/1024px-Transformer3d_col3_cs.svg.png
- [2] MACH, Věslav. *VŠB - Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://homel.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/6transformatory.html>
- [3] MAGDA, Králová. *Techmania science center* [online]. Upraveno, [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: https://edu.techmania.cz/sites/default/files/styles/large/public/encyklopedie/insert/11_9.gif?itok=AlEscfS-
- [4] ELMOUDI, A.; LEHTONEN, M. a kol. *IEEE explore* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1665344&tag=1>
- [5] GUREVICH, Vladimir. *Power Supply Devices and Systems of Relay Protection*. Boca Raton, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014, ISBN 978-1-4665-8379-5.
- [6] SIDHARD, Goudtham Dash. *slideshare.net* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://www.slideshare.net/biswajitcet13/harmonic-mitigating-transformer>
- [7] IEEE Std C57.110-2018. IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents. . New York (USA), 2018, 66 stran.
- [8] AUTOR NEZNÁMÝ. *Eddy current loss* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://circuitglobe.com/what-is-eddy-current-loss.html>
- [9] DRÁPELA, Jiří. *Kvalita elektrické energie a EMC Harmonické* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MPQ1/Ucebni_text_MPQ1.pdf
- [10] *Zenatix; K - rated transformers* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://zenatix.com/k-factor-for-transformer/>
- [11] *Canada transformers K - factor* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://canadatransformers.com/k-factor/>
- [12] *Harmonic mitigating transformers* [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://ouc.bizenergyadvisor.com/article/harmonic-mitigating-transformers>

- [13] Metody chlazení transformátoru [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://webstarsnet.com/cs/115-cooling-methods-of-a-transformer.html>
- [14] Types of losses in a Transformer [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: <https://circuitglobe.com/types-of-losses-in-transformer.html>
- [15] SCHNABL, Jan. MĚŘENÍ ZTRÁT FEROMAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky.
- [16] SÝKORA, Jiří. Vyšší harmonické a mezipharmonické [online]. [cit. 19.6.2020]. Dostupný na WWW: https://www.powerwiki.cz/attach/EZS/prednaska_02.pdf

PŘÍLOHY

Příloha A: Kód FFT analýzy v programu MATLAB:

```
clear %vycisti workspace
close all % zavre vsechny figure
disp('=====')
dv=datevec(now); %datum vektor
den=num2str(dv(3));
mes=num2str(dv(2));rok=num2str(dv(1));hod=num2str(dv(4));min=num2str(dv(5));
%%zde zvolit vlastní cestu
filename1 = 'C:\users\daniel\downloads\FFT Vesely 30.3.2020 (x osa rad harm)\TEK00000.txt';
filename2 = 'C:\users\daniel\downloads\FFT Vesely 30.3.2020 (x osa rad harm)\TEK00001.txt';
filename3 = 'C:\users\daniel\downloads\FFT Vesely 30.3.2020 (x osa rad harm)\TEK00002.txt';
A=load(filename1);
AA=load(filename2);
AAA=load(filename3);
delka=length(A(:,1));
C1(:,1)=A(:,1); % time
C1(:,2)=A(:,2); % sine wave
C2(:,1)=AA(:,1); % time
C2(:,2)=AA(:,2); % sine wave
C3(:,1)=AAA(:,1); % time
C3(:,2)=AAA(:,2); % sine wave
T1=C1(2,1)-C1(1,1); %vzorkovaci perioda
T2=C2(2,1)-C2(1,1);
T3=C3(2,1)-C3(1,1);
%pocet FFT analyz=delka souboru-delka jedne FFT lomeno delka posuvu pro dalsi FFT,
zaokrouhlit dolu...-0,5
% prvni soubor
D1=C1(:,2); %druhy sloupec do matice D pro FFT analyzu
Y1 = fft(D1*(1/20000));
N1=length(Y1);
n21=round(N1/2);
amplituda1(:,1)=abs(Y1)/(N1/2);% musi se delit polovicnim pocetem nascitavanych bodu do
sumy v def. integralu
amp11(1:round(N1/2),1)=amplituda1(1:round(N1/2),1);
fr1(:,1) = ((1/T1)*(0:round(N1/2-1))/(N1))'; % taky slapalo pro: fr =
(1/T)*(0:round(N/2-1))/(N);
% druhy soubor
D2=C2(:,2); %druhy sloupec do matice D pro FFT analyzu
Y2 = fft(D2*(1/20000));
N2=length(Y2);
n22=round(N2/2);
amplituda2(:,1)=abs(Y2)/(N2/2);
amp12(1:round(N2/2),1)=amplituda2(1:round(N2/2),1);
fr2(:,1) = ((1/T2)*(0:round(N2/2-1))/(N2))';
% treti soubor
D3=C3(:,2); %druhy sloupec do matice D pro FFT analyzu
Y3 = fft(D3*(1/20000));
N3=length(Y3);
n23=round(N3/2);
amplituda3(:,1)=abs(Y3)/(N3/2);% musi se delit polovicnim pocetem nascitavanych bodu do
sumy v def. integralu
amp13(1:round(N3/2),1)=amplituda3(1:round(N3/2),1);
fr3(:,1) = ((1/T3)*(0:round(N3/2-1))/(N3))'; % taky slapalo pro: fr =
(1/T)*(0:round(N/2-1))/(N);
figure(1);
subplot(2,1,1);
plot(C1);
title('Soubor TEK00000, Originalni signal');
xlabel('t [ms]');
ylabel('I [A]');
subplot(2,1,2);
bar(fr1/50,abs(Y1(1:10000)));
title('FFT')
xlabel('Harmonicka c. ');
ylabel('I (A) ');
set(gca,'XLim',[0 1e1]);
figure(2);
subplot(2,1,1);
plot(C2);
title('Soubor TEK00001, Originalni signal');
xlabel('t [ms]');
```

```

ylabel('I [A]');
subplot (2,1,2);
bar(fr2/50,abs(Y2(1:10000)));
title('FFT')
xlabel('Harmonicka c. ');
ylabel('I (A) ');
set(gca, 'XLim', [0 1e1]);
figure(3);
subplot (2,1,1);
plot (C3);
title('Soubor TEK00002, Originalni signal');
xlabel('t [ms]');
ylabel('I [A]');
subplot (2,1,2);
bar(fr3/50,abs(Y3(1:10000)));
title('FFT')
xlabel('Harmonicka c. ');
ylabel('I (A) ');
set(gca, 'XLim', [0 1e1]);

```

Příloha B: DVD s naměřenými signály