

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Automatické měření a vyhodnocování dat frekvenční
analýzy transformátorů**

Klára Puchtová 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Klára PUCHTOVÁ
Osobní číslo:	E18B0089P
Studijní program:	B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Elektrotechnika a energetika
Téma práce:	Automatické měření a vyhodnocení dat frekvenční analýzy transformátorů
Zadávací katedra:	Katedra výkonové elektroniky a strojů

Zásady pro vypracování

Práce se zabývá automatickým měřením a vyhodnocením dat frekvenční analýzy transformátorů. Cílem je připravit v prostředí Matlab skripty na ovládání testovacího napájecího zdroje a osciloskopu, automatické zpracování dat z osciloskopu a následně vytvoření náhradního schématu transformátoru.

1. Popište základní náhradní schémata transformátorů a metodiku získávání parametrů těchto modelů.
2. Navrhněte a naprogramujte v prostředí Matlab skript na automatickou identifikaci parametrů pro transformátory pracující ve frekvenčním rozsahu 15 Hz až 150 Hz.
3. Provedte experimentální měření na laboratorním transformátoru a popište naměřené výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Václav Bartoň, Bohumil Skala: Měření na elektrických strojích.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Talla, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Dodatek k zadání Bakalářské práce

Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Bod 1. zůstává v plném rozsahu. (Popište základní náhradní schémata transformátorů a metodiku získávání parametrů těchto modelů.)

Bod 2. Navrhněte a naprogramujte v prostředí Matlab skript na automatickou identifikaci parametrů pro transformátory pracující ve frekvenčním rozsahu 15 Hz až 150 Hz.

je změněn na:

2. Popište náhradní schéma transformátoru vhodné pro vysoké frekvence.

Bod 3. Provedte experimentální měření na laboratorním transformátoru a popište naměřené výsledky

je změněn na:

3. Popište možnou metodu získání parametrů náhradního modelu transformátoru pomocí automatizovaného měření a vyhodnocení dat frekvenční analýzy transformátoru

V Plzni dne 8.4. 2021

Vedoucí práce:

Bohu na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 8.4. 2021

Student:

V Plzni dne



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Tato práce se zabývá vysokofrekvenčním modelováním transformátorů. Cílem je popsat náhradní schéma transformátoru, jeho parametry a způsob, jak tyto parametry změřit a vypočítat.

Klíčová slova

transformátor, náhradní schéma, vysokofrekvenční model, parazitní kapacita

Abstract

This bachelor thesis presents high frequency modeling of transformers. The aim is to describe the transformer equivalent circuit, its parameters, and the way how to obtain them.

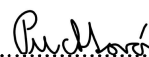
Key words

transformer, equivalent circuit, high frequency model, parasitic capacitance

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala 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 práce, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Klára Puchtová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakobovi Tallovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

Obsah

OBSAH	9
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 TRANSFORMÁTOR	12
1.1 PRINCIP	12
1.2 PROVEDENÍ TRANSFORMÁTORŮ	14
1.3 MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA	15
1.4 ZTRÁTY V TRANSFORMÁTORU.....	16
1.4.1 Ztráty v železe	16
1.4.2 Joulovy ztráty.....	17
1.4.3 Přídavné ztráty	17
1.5 ÚČINNOST	18
1.6 PŘEVOD TRANSFORMÁTORU.....	19
2 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	20
2.1 PŘIBLIŽNÉ URČENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU.....	21
2.1.1 Zapojení měření.....	22
2.1.2 Měření naprázdno.....	23
2.1.3 Měření nakrátko	24
2.1.4 Měření odporů vinutí.....	26
2.2 FREKVENČNÍ ROZSAH NÍZKOFREKVENČNÍHO NÁHRADNÍHO SCHÉMA	27
2.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU PRO VYSOKÉ FREKVENCE	27
3 METODIKA ZÍSKÁVÁNÍ PARAMETRŮ PRO VYSOKOFREKVENČNÍ MODEL	30
3.1 FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS (FRA)	30
3.2 STANOVENÍ KAPACITY MEZI VINUTÍMI	31
3.3 STANOVENÍ MEZIZÁVITOVÝCH KAPACIT	32
4 SIMULACE MODELU	34
4.1 POROVNÁNÍ DVOU MODELŮ	34
4.2 MĚŘENÍ KAPACITY MEZI VINUTÍMI	39
4.3 MĚŘENÍ MEZIZÁVITOVÝCH KAPACIT	40
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44

Úvod

S vývojem výkonové elektroniky a jejím stále větším nasazováním v oblasti energetiky vzniká také potřeba analyzovat její vlivy na prvky přenosové a distribuční soustavy. Použitím měničů jsou totiž do sítě zanášeny vyšší harmonické, které zde působí negativně. Vyšší harmonické se mohou v síti objevovat také v důsledku úderu blesku do vedení, či různých přechodových dějů (např. spínání vedení). Aby mohly být tyto vlivy analyzovány, je potřeba vytvořit patřičné modely, které jsou platné i pro vysoké frekvence.

Tato práce se konkrétně zabývá modelováním transformátoru. Cílem je nejprve popsat základní náhradní schéma platné pro nízké frekvence a poté toto schéma rozšířit tak, aby s určitou přesností platilo i pro vysoké frekvence. Je popsána metoda, jak určit parametry takového náhradního schématu a ta je následně ověřena simulací v softwarovém nástroji PLECS.

Seznam symbolů a zkratk

B	magnetická indukce
C	kapacita
f	frekvence
H	intenzita magnetického pole
I	proud
j	imaginární jednotka
k	převod transformátoru
l	délka
L	induktance
m	počet fází
N	počet závitů
P	činný výkon
R	odpor
S	zdánlivý výkon, plocha
t	čas
U	efektivní hodnota napětí
u_i	indukované napětí
Φ	magnetický tok
X	reaktance
Z	impedance
δ	hloubka vniku
Δ	úbytek, ztráty
η	účinnost
λ	poměrný zatěžovatel
γ	měrná vodivost
π	Eulerovo číslo
μ	permeabilita
ρ	měrná rezistivita
φ	fázový posun
Ψ	spřažený tok
ω	úhlová rychlost

1 Transformátor

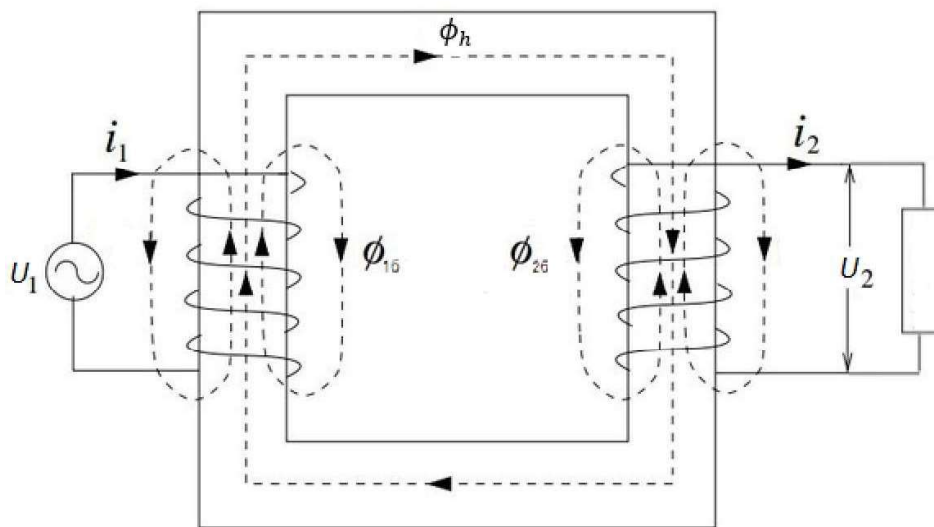
Transformátor je elektrický netočivý stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na elektrickou energii s jinými parametry. Transformovat lze napětí, proud a impedanci.

Transformátor se používá pro minimalizaci ztrát při přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti, pro přizpůsobení napětí pro spotřebiče nebo pro galvanické oddělení obvodů.

[1]

1.1 Princip

Transformátor funguje na principu elektromagnetické indukce. Skládá se ze dvou cívek o různých závitech N_1 , N_2 a feromagnetického jádra, který obě cívky propojuje a zajišťuje tak magnetickou vazbu. Jako primární strana transformátoru se označí vinutí cívky, které je napájeno ze zdroje a jako sekundární strana vinutí, na které je připojena zátěž. [1]



Obrázek 1. 1 Schéma transformátoru [3]

Nejprve se předpokládá, že obvod sekundárního vinutí je rozpojen. Primární vinutí je napájeno střídavým napětím a prochází jím střídavý proud i_1 , který budí střídavý magnetický tok Φ_1 . Ten se uzavírá primárně přes feromagnetické jádro (tzv. hlavní tok), malá část toku se ale uzavře také přes prostředí kolem primárního vinutí, a tudíž se nepodílí na přenosu energie (tzv. rozptylový tok).

Pokud se na sekundární vinutí připojí zátěž, začne obvodem protékat proud i_2 , který vyvolá magnetický tok Φ_2 . Ten má opět 2 složky – hlavní a rozptylový tok.

Jádrem transformátoru pak prochází výsledný tok, který je dán součtem hlavních toků indukovaných od obou vinutí

$$\phi_h(t) = \phi_{1h}(t) + \phi_{2h}(t) \quad (1.1)$$

Tento magnetický tok indukuje napětí na obou vinutích podle Faradayova indukčního zákona

$$u_i = N \frac{d\phi_h}{dt} = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.2)$$

Vzhledem k tomu, že počet závitů primárního a sekundárního vinutí je různý, liší se také velikosti indukovaných napětí. Zároveň platí zákon zachování energie, a proto se výkony na primární a sekundární straně při zanedbání ztrát rovnají.

Předpokládá se, že magnetický tok jádrem má harmonický průběh. Potom pro indukované napětí platí

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dt}(N\phi_h \sin \omega t) = N\phi_h \omega \cos \omega t \quad (1.3)$$

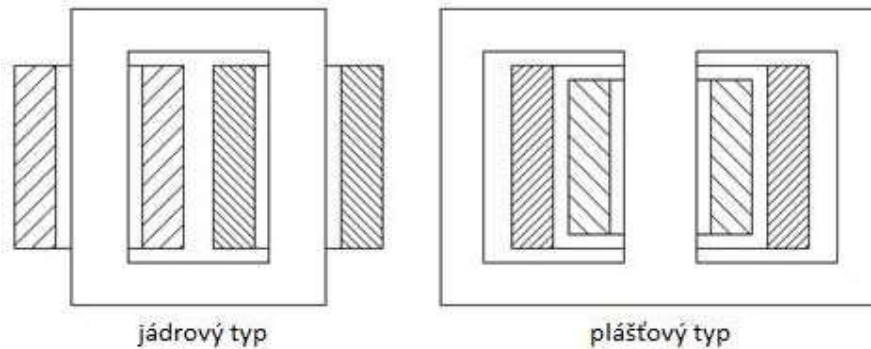
Z předchozího vztahu se získá výsledná rovnice pro efektivní hodnotu indukovaného napětí [1]

$$U_i = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N\phi_h = 4,44fN\phi_h \quad (1.4)$$

1.2 Provedení transformátorů

Jádro transformátoru je složeno z tenkých, navzájem izolovaných plechů a je vyrobeno z magneticky měkkého materiálu. Tímto provedením se omezují ztráty v železe – ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Tvar jádra je odstupňovaný tak, aby co nejlépe vyplňoval kruhovou plochu, díky čemuž se snižuje potřebná délka vinutí. [1]

Z hlediska konstrukce můžeme transformátory rozdělit na jádrové a plášťové.



Obrázek 1. 2 Typy jednofázových transformátorů [4]

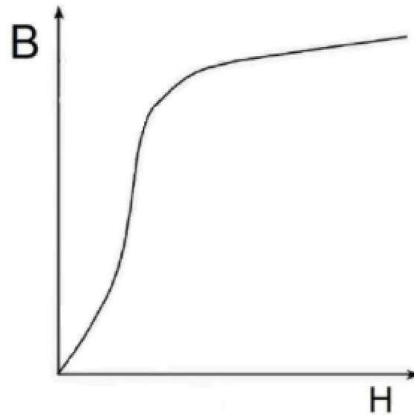
Jádrový transformátor má dvě jádra, která jsou spojena tzv. spojkami. Obě jádra vedou celý hlavní magnetický tok. Primární a sekundární vinutí jsou umístěna na obou jádrech koncentricky tak, že vinutí na nižší napětí je umístěno blíže jádru. Toto zapojení zajišťuje lepší magnetickou vazbu mezi oběma vinutími.

Plášťový transformátor má obě vinutí umístěna na hlavním sloupcu, který vede celý hlavní tok. Tento tok se poté dělí do dvou krajních jader, které žádné vinutí nenesou. Tento typ konstrukce má menší rozptylové toky, jeho sekundární napětí méně kolísá a je tedy tvrdším zdrojem napětí než transformátor jádrový.

I přesto, že účinnost transformátoru je velmi vysoká, přenos energie není dokonalý a vznikají ztráty, které se projeví zvýšením teploty. Toto teplo je potřeba odvést, aby se transformátor nepřehříval. Chladícím médiem nejčastěji bývá vzduch nebo olej. Olej se používá především u transformátorů s vysokým výkonem, transformátory s menším výkonem jsou chlazeny vzduchem. [1] [2]

1.3 Magnetizační charakteristika

Magnetizační charakteristika je zobrazení magnetické indukce v závislosti na intenzitě magnetického pole v jádře transformátoru.



Obrázek 1. 3 Magnetizační charakteristika transformátoru

Kde $B \approx \varphi_n$ a $H \approx i_0$. Tento graf tedy zároveň popisuje závislost magnetického toku na magnetizačním proudu. Je zřejmé, že průběh není lineární, což zvyšuje náročnost výpočtů při modelování transformátoru. Pro běžné provozní stavy lze průběh linearizovat, nicméně pro simulaci přechodových dějů je vhodné pro větší přesnost nelineární průběh uvažovat.

Křivka nejprve strmě narůstá, ale poté se sklon změní a růst se téměř zastaví. Tato oblast se nazývá saturační oblast a z hlediska provozu transformátoru je nežádoucí, jelikož v důsledku nasycení jádra při malé změně magnetického toku prudce narůstá magnetizační proud a transformátor je přetěžován. Pracovní oblast transformátoru by měla ležet v oblasti, kde k saturaci nedochází. Obvykle pracovní bod leží těsně pod kolenem, aby bylo jádro maximálně využito a výkon co největší. [6]

1.4 Ztráty v transformátoru

Ztráty v transformátoru lze rozdělit na ztráty v železe, ztráty Joulovy, a přídatné ztráty.

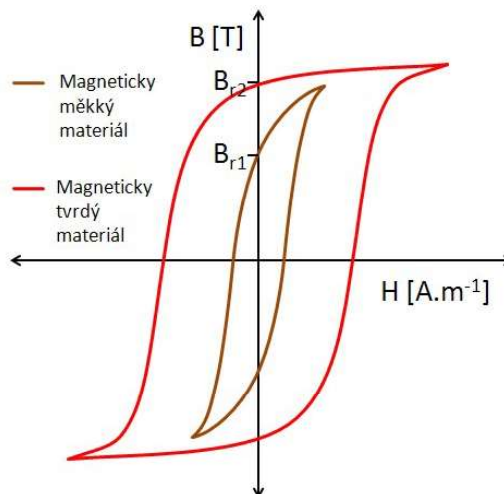
1.4.1 Ztráty v železe

Ztráty v železe se skládají ze ztrát vířivými proudy a ztrát hysterezních. Tyto ztráty jsou nezávislé na zatížení, a proto se jim říká ztráty naprázdno. Platí

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeV} + \Delta P_{FeH} \quad (1.5)$$

$$\Delta P_{FeV} \approx U^2, f^2 \quad \Delta P_{FeH} \approx U^2, f$$

Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Z toho také vyplývá, jak tyto ztráty omezit – použitím magneticky měkkého materiálu, tedy materiálu, který má úzkou hysterezní smyčku. Ztráty jsou závislé také na frekvenci a druhé mocnině napětí. S rostoucím napětím se zvětšuje plocha hysterezní smyčky. S rostoucí frekvencí se zase zvyšuje frekvence přemagnetování jádra a tím rostou také ztráty. [6]



Obrázek 1. 4 Porovnání hysterezních smyček [13]

Vířivé proudy vznikají v jádře transformátoru vlivem proměnlivého magnetického toku. To má za následek indukci napětí a jelikož je jádro vodivé, začne jím procházet proměnlivý proud, který působí proti změně toku. Průchodem proudu dochází k ohřevu jádra, a tedy ke ztrátám. Tyto ztráty se zvyšují s druhou mocninou frekvence a napětí. [6]

Ztráty vířivými proudy se snižují zvýšením elektrického odporu jádra. Platí

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.6)$$

Kde ρ je měrná rezistivita, l je délka vodiče a S je obsah příčného průřezu vodiče. Pro zvýšení odporu je nutné zvětšit poměr délky a plochy. Toho lze dosáhnout rozdělením jádra na menší, navzájem izolované části. Odpor lze také zvýšit legováním jádra křemíkem.[6]

1.4.2 Joulovy ztráty

Joulovy ztráty vznikají ve vinutí, které se otepluje vlivem procházejícího elektrického proudu. Tyto ztráty převažují v chodu nakrátko a jsou závislé na velikosti protékajícího proudu.

$$\Delta P_K = m(R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \quad (1.7)$$

1.4.3 Přídavné ztráty

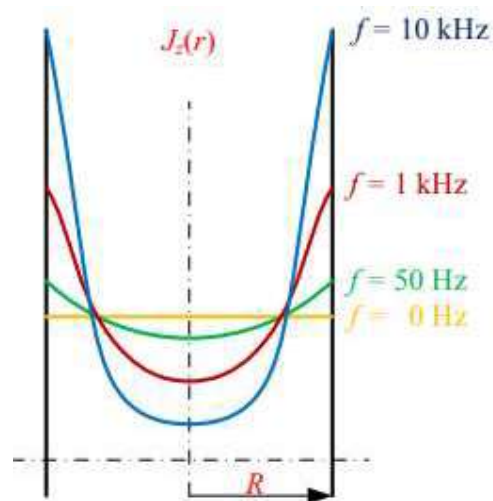
Do přídavných ztrát se řadí ztráty vířivými proudy v masivních konstrukčních částech a ztráty skin efektem.

Skin efekt neboli povrchový jev vzniká v důsledku nerovnoměrně rozložené proudové hustoty. Pokud vodičem prochází střídavý proud, vytváří kolem sebe proměnlivé magnetické pole. Toto pole částečně zasahuje i dovnitř vodiče, kde indukuje vířivé proudy. Ty uvnitř vodiče působí proti protékajícímu proudu, na povrchu se naopak s protékajícím proudem sčítají. Dochází tedy k vytlačování proudu směrem k povrchu vodiče, čímž se snižuje efektivní plocha vodiče. Snížení plochy se projeví zvýšením odporu vodiče. Tyto ztráty jsou obvykle pro frekvenci 50 Hz zanedbatelné. [13]

Skinefekt lze popsat veličinou zvanou hloubka vniku. Ta je definována jako hloubka pod povrchem vodiče, kde proudová hustota klesne oproti povrchu na 36,8 %. [13]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \gamma}} \quad (1.8)$$

Kde f je frekvence, μ je permeabilita vodiče a γ je měrná vodivost. Ze vztahu lze vidět, že hloubka vniku závisí na frekvenci procházejícího proudu. Čím je frekvence vyšší, tím se velikost hloubky vniku snižuje a tak rostou ztráty. [13]



Obrázek 1. 5 Skinefekt [13]

Stejně jako Joulovy ztráty jsou tyto ztráty závislé na velikosti protékajícího proudu.

1.5 Účinnost

Účinnost je obecně dána poměrem výkonu a příkonu.

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + \Delta P} \quad (1.9)$$

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_K \quad (1.10)$$

Kde ΔP_0 představují ztráty naprázdno – ztráty v železe a ΔP_K ztráty nakrátko – Joulovy a přídavné ztráty.

Účinnost transformátoru je obecně vysoká a souvisí s výkonem transformátoru. Pro velké výkony dosahuje až 99 %, ale pro menší výkony klesá.

Ztráty byly popsány v předchozí kapitole. Vzhledem k tomu, že ztráty nakrátko jsou závislé na zatěžujícím proudu, je tuto závislost nutné respektovat při vyjadřování účinnosti transformátoru. [1]

$$\Delta P_K = 3R_K I_1^2 = 3R_K (\lambda I_{1N})^2 = \lambda^2 \Delta P_{KN} \quad (1.11)$$

Kde λ představuje poměr zatěžujícího a jmenovitého proudu. [10] Výsledný vztah pro účinnost je:

$$\eta = \frac{\lambda S \cos \varphi}{\lambda S \cos \varphi + \Delta P_0 + \lambda^2 \Delta P_{KN}} \quad (1.12)$$

1.6 Převod transformátoru

Převod transformátoru k je definován jako poměr vnitřních indukovaných napětí na primární a sekundární straně. [6]

$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{4,44N_1\phi_n f}{4,44N_2\phi_n f} = \frac{N_1}{N_2} = k \cong \frac{U_1}{U_2} \quad (1.13)$$

Kromě výše uvedeného je možné převod k také vyjádřit pomocí poměrů proudů, či impedancí. Pro odvození lze použít vztah, který popisuje rovnost výkonů na primární a sekundární straně. [6]

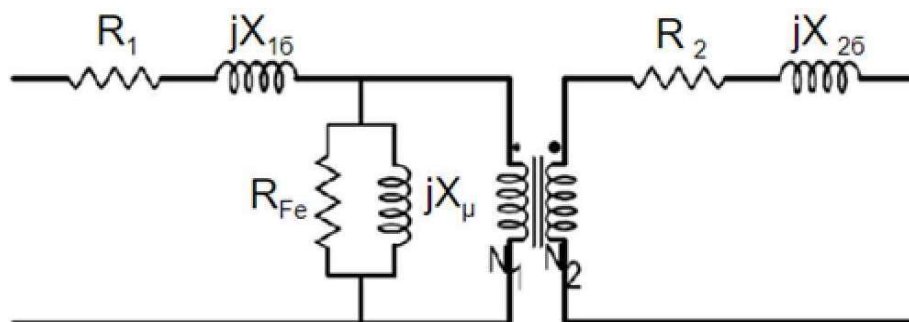
$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 & P_1 &= P_2 \\ U_1 I_1 &= U_2 I_2 & \frac{U_1^2}{Z_1} &= \frac{U_2^2}{Z_2} \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{I_2}{I_1} = k & \frac{U_1^2}{U_2^2} &= \frac{Z_1}{Z_2} = k^2 \end{aligned} \quad (1.14)$$

2 Náhradní schéma transformátoru

Transformátor lze zakreslit jako pasivní dvojbran ve tvaru T-článku, jehož prvky mají takové parametry, které přibližně odpovídají vlastnostem transformátoru. Pomocí náhradního schématu a měření nakrátko a naprázdno lze vypočítat parametry transformátoru. Náhradní schéma platí pouze pro harmonický průběh veličin a popisuje vždy jednu fázi. Pro trojfázový transformátor je možné toto schéma použít v případě, že transformátor je souměrný nejen co se týká jeho konstrukce, ale také napájení a zátěže.[1] [10]

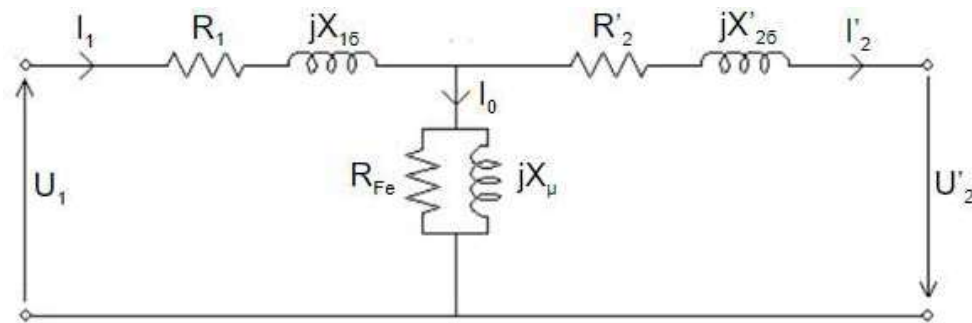
Jednotlivé komponenty transformátoru nejsou dokonalými prvky a tento fakt je nutné při vytváření náhradního schématu respektovat. Vinutí se s procházejícím proudem zahřívají, čímž vznikají Joulovy ztráty. Tyto ztráty se zohlední pomocí odporů v podélné větvi, které se zavedou jak na primární, tak sekundární straně. Jak již bylo zmíněno dříve, magnetický tok se neuzavře plně přes jádro, jeho část, tzv. rozptylový tok, se uzavře přes prostředí kolem vinutí. V náhradním schématu je toto zaneseno jako reaktance v podélné větvi, opět jak na primární, tak sekundární straně. [12]

Co se týká jádra transformátoru, také v něm dochází ke ztrátám. Přidáním odporu do příčné větve se zohlední ztráty v železe. Nakonec je ještě potřeba vyjádřit magnetizační proud přidáním reaktance do příčné větve paralelně k odporu. [12] I když reálná magnetizační charakteristika nemá lineární průběh, v tomto schématu bude magnetizační reaktance uvažována jako lineární. Výsledné schéma je na obrázku níže.



Obrázek 2. 1 Náhradní schéma transformátoru [5]

Toto schéma je postačující pro popis transformátoru pracujícího v nízkých frekvencích. Při sestavování náhradního schématu je také nutno brát v úvahu převod transformátoru. Pro určité zjednodušení je možné parametry jednoho vinutí přepočítat pomocí převodu k na druhou stranu. Obvykle se takto přepočítává sekundární vinutí na stranu primární. Přepočet je však samozřejmě možný i opačným směrem, tedy z primární strany na stranu sekundární. [6] Výsledné schéma vypadá takto:



Obrázek 2. 2 Náhradní schéma transformátoru s přepočtem na primární stranu [7]

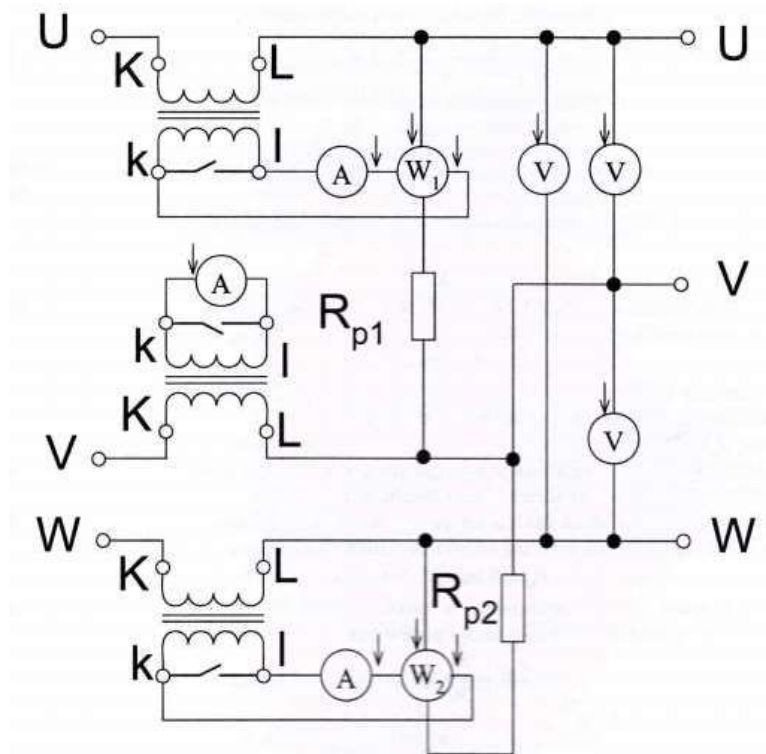
Impedance jednotlivých prvků je velmi odlišná. Odpor respektující ztráty v železe je pro minimalizaci ztrát v železe co možná nejvyšší, řádově $k\Omega$. Někdy lze tento odpor při měřeních zanedbat, jelikož značně větší část proudu v příčné větvi se uzavírá přes magnetizační reaktanci. Také její impedance je řádově v $k\Omega$, je však menší než odpor R_{Fe} . Naopak v podélné větvi je impedance co možná nejnižší. Platí, že na straně s nižším napětím jsou rozptylová reaktance i odpor vinutí menší, jelikož je kvůli většímu proudu potřeba vodič s větším průřezem.

2.1 Přibližné určení parametrů náhradního schématu

Stanovení prvků náhradního schématu je důležité pro zjištění vlastností transformátoru. Parametry lze stanovit měřením nakrátko a naprázdno a aplikací některých základních vztahů (Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony). [1]

2.1.1 Zapojení měření

Pro měření trojfázového transformátoru lze použít Aronovo zapojení.



Obrázek 2. 3 Aronovo zapojení [9]

Činný výkon zátěže je dán součtem výkonů obou wattmetrů

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.1)$$

V tomto zapojení je měřeno sdružené napětí. V případě symetrického napájení lze naměřené hodnoty zprůměrovat

$$U_s = \frac{U_{UV} + U_{VW} + U_{UW}}{3} \quad (2.2)$$

Obdobně lze také stanovit fázový proud jako průměr naměřených proudů

$$I = \frac{I_U + I_V + I_W}{3} \quad (2.3)$$

Celkový zdánlivý výkon je

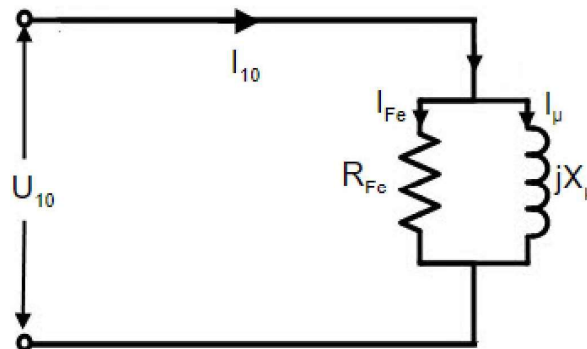
$$S = \sqrt{3}U_S I \quad (2.4)$$

Pro účinník platí

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.5)$$

2.1.2 Měření naprázdno

Při měření naprázdno jsou svorky sekundárního vinutí rozpojeny. Obvykle je napájeno vinutí na straně s nižším napětím. Při jmenovité hodnotě napětí na sekundární straně je změřeno napětí U_{10} , proud I_{10} a výkon P_{10} . V chodu naprázdno není z transformátoru odebírána žádná energie a veškerý dodaný výkon slouží k pokrytí ztrát v magnetickém obvodu (viz 1.6). Vzhledem k tomu, že proud vinutím je malý ($I_0 \approx 1-10\% I_n$), lze většinou prvky v podélné větvi zanedbat. [1][9]



Obrázek 2 4 Transformátor naprázdno [8]

Prvky příčné větve se dopočítají pomocí následujících vztahů

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} \quad (2.6)$$

$$L_{\mu} = \frac{U_{10}^2}{\omega P_{10} \operatorname{tg} \varphi_{01}} \quad (2.7)$$

Při výpočtech je nutné rozlišovat, zda se jedná o jednofázový či trojfázový transformátor a případně pro správný dopočet naměřené hodnoty přepočítat na fázové hodnoty. [10]

Pokud není k dispozici údaj o účinníku sítě, lze jej snadno dopočítat. Následující vztah platí pro jednofázový transformátor. [9]

$$\cos \varphi_{01} = \frac{P_{10}}{U_f I_f} \quad (2.8)$$

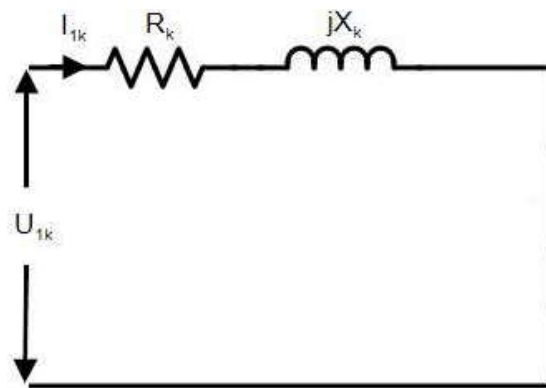
Pro trojfázový transformátor platí tato rovnice

$$\cos \varphi_{01} = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} U_s I_f} \quad (2.9)$$

Kromě stanovení parametrů příčné větve náhradního schématu lze také z měření naprázdno stanovit magnetizační charakteristiku, průběh účinníku, průběh ztrát naprázdno a proud naprázdno. [9]

2.1.3 Měření nakrátko

Při měření nakrátko jsou svorky sekundárního vinutí spojeny dokrátka. Obvykle je napájeno vinutí na straně s vyšším napětím. Měří se napětí U_{1k} , proud I_{1k} a výkon P_{1k} při jmenovitém proudu na sekundární straně. Při tomto měření je magnetický obvod nenasycený a veškerý dodaný výkon slouží ke krytí Joulových ztrát ve vinutí a ztrát přídatných. Z tohoto důvodu mohou být zanedbány příčné prvky náhradního schématu. Podélné prvky lze poté sečíst a sloučit. [1] [10]



Obrázek 2. 5 Transformátor nakrátko [8]

Výpočet celkové impedance nakrátko závisí na tom, zda se jedná o transformátor jednofázový, či trojfázový. Následující vztah platí pro jednofázový transformátor

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (2.10)$$

U trojfázového vinutí navíc musí být bráno v potaz, zda je vinutí zapojeno do hvězdy

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_k} \quad (2.11)$$

či do trojúhelníka

$$Z_k = \frac{U_k\sqrt{3}}{I_k} \quad (2.12)$$

Z dopočítané impedance je poté vyjádřena reálná část, která odpovídá R_k a imaginární část, která odpovídá X_k

$$Z_k \cos \varphi_k = R_k = R_1 + R_2' \quad (2.13)$$

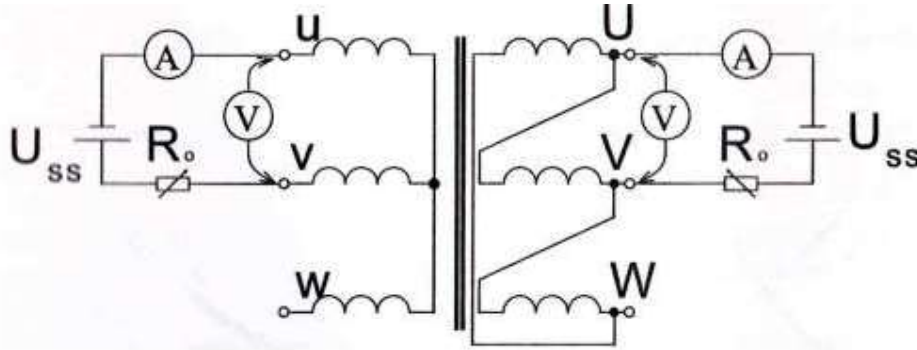
$$Z_k \sin \varphi_k = X_k = X_1 + X_2' \quad (2.14)$$

Z předchozích vztahů je zřejmé, že lze určit pouze součet těchto veličin. Na základě rozměrů a proudové hustoty ve vinutích lze ale dokázat, že platí $R_1 = R_2'$ a $X_1 = X_2'$. [1]

Při měření nakrátko se dále stanovuje charakteristika nakrátko průběh ztrát nakrátko, průběh účinníku a napětí nakrátko. Napětí nakrátko je důležitý údaj, jelikož určuje tvrdost transformátoru. Udává se v procentech jako poměr napětí nakrátko a jmenovitého napětí. Čím je tato hodnota vyšší, tím je transformátor měkčím zdrojem napětí. Zároveň má ale větší zkratuvzdornost, protože zkratový proud je omezován pouze impedancí nakrátko. [1] [9]

2.1.4 Měření odporů vinutí

Pro stanovení odporů vinutí se používá Ohmova metoda pro měření malých odporů. Měří se stejnosměrným napětím. Pro měření je vhodné zvolit menší proud, aby nedocházelo k nepřesnému měření vlivem oteplení vodičů. U trojfázového transformátor je vhodné měřit tzv. sdružený odpor, tedy odpor mezi vinutími, v tomto případě totiž nezáleží na typu spojení vinutí a výpočet Joulových ztrát je v obou případech totožný.



Obrázek 2. 6 Měření odporu vinutí [9]

Pro spojení do hvězdy platí, že změřený sdružený odpor odpovídá dvěma odporovým vinutím zapojeným do série. Výsledný odpor jedné fáze je pak vzhledem k symetrii poloviční. Vzhledem k tomu, že náhradní schéma transformátoru je vztaženo na jednu fázi, je vhodné všechny tři hodnoty odporů jednotlivých fází zprůměrovat.

$$R_f = R_u = R_v = \frac{R_1}{2} \quad (2.15)$$

$$R_f = \frac{R_u + R_v + R_w}{3} \quad (2.16)$$

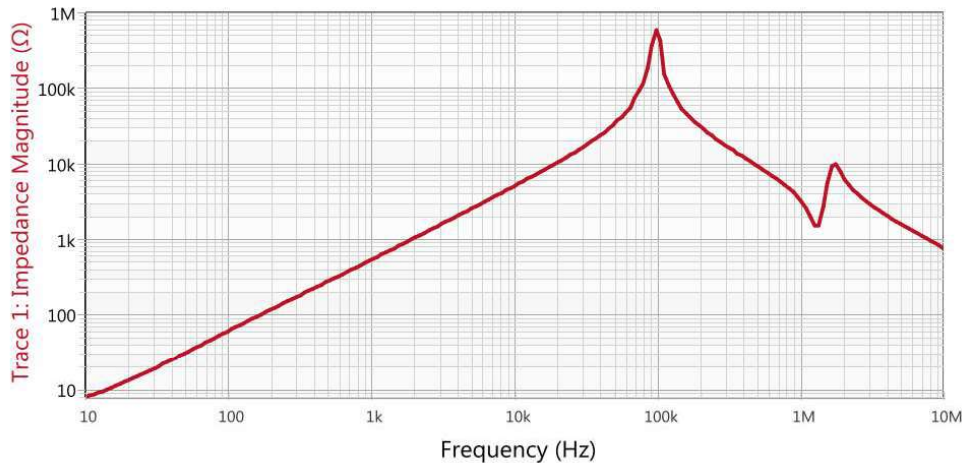
U spojení do trojúhelníka je sdružený odpor roven paralelnímu spojení jedné fáze a zbylých fází v sérii.

$$R_1 = \frac{R_u(R_v + R_w)}{R_u + R_v + R_w} = \frac{2R_f^2}{3R_f} = \frac{2}{3}R_f \quad (2.17)$$

U jednofázového transformátoru se pro stanovení odporu vinutí použije Ohmův zákon.

2.2 Frekvenční rozsah nízkofrekvenčního náhradního schéma

Pro přesné stanovení parametrů náhradního schématu je také důležité vědět, pro jaké frekvence lze nízkofrekvenční schéma uvažovat. Možnou metodou je měření a vyhodnocení průběh impedance transformátoru v závislosti na frekvenci. Při tomto měření je sekundární strana naprázdno a měří se impedance primárního vinutí. Možná frekvenční odezva je zobrazena na obrázku 2. 6. [15]



Obrázek 2. 7 Frekvenční odezva impedance primárního vinutí naprázdno [15]

Na grafu frekvenční závislosti je vidět, že křivka nejprve podle očekávání lineárně roste (impedance cívek roste). Poté se ale sklon křivky mění a objevuje se rezonance zapříčiněná působením parazitních prvků. V této oblasti již nelze vliv těchto parazitních prvků zanedbat a je potřeba je zohlednit i v náhradním schématu. [15]

Z výše uvedeného vyplývá, že nízkofrekvenční schéma lze uvažovat na takovém frekvenčním rozsahu, pro který má závislost impedance na frekvenci lineární průběh. [15]

2.3 Náhradní schéma transformátoru pro vysoké frekvence

Pokud by měření nakrátko a naprázdno probíhalo při různých frekvencích a zároveň by bylo stále uvažováno výše popisované náhradní schéma, výsledkem měření by byly pokaždé jiné hodnoty indukčností. Při zvyšující se frekvenci se totiž vlastnosti transformátoru začínají lišit a dosud probírané náhradní schéma k přesnému popisu nestačí. Projevují se různé parazitní elementy, především kapacitního charakteru. S rostoucí frekvencí také rostou ztráty – konkrétně ztráty v železe a ztráty v důsledku skinefektu. Rostoucí ztráty ale nebudou v této práci zohledněny, což samozřejmě sníží přesnost výpočtů.

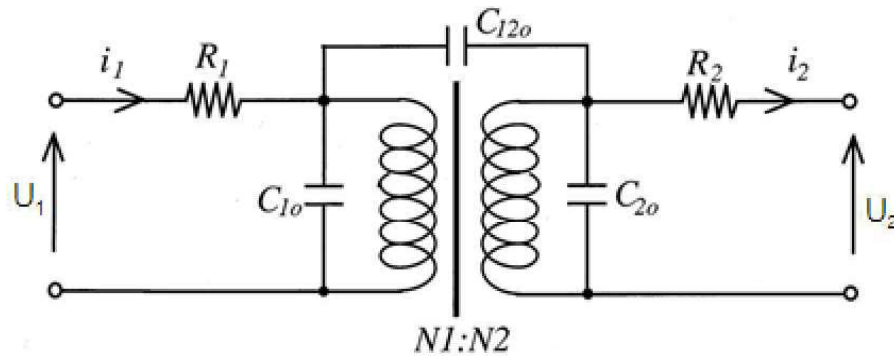
Parazitní elementy je možné v náhradním schématu zohlednit přidáním kapacitorů. Pro tyto účely byla vytvořena různá náhradní schémata s různou mírou přesnosti. Vzhledem k tomu, že jsou náhradní schémata využívána různými výpočetními programy pro analýzu obvodů, měla by splňovat několik zásadních podmínek

- Schéma by mělo popisovat vlastnosti transformátoru s požadovanou přesností.
- Prvky náhradního schéma musí být možné určit pomocí měření.
- Pro rychlejší analýzu by počet prvků v náhradním schématu měl být co možná nejnižší. [12]

Parazitní kapacity mají z hlediska provozu transformátoru při vysokých frekvencích zásadní vliv. Kromě vinutí a magnetického jádra je důležitou součástí transformátoru také izolace, která jednotlivé komponenty odděluje. Tím, že se velikost napětí na těchto komponentech liší a zároveň jsou oddělené izolační vrstvou, dochází ke kumulaci elektrické energie. Tuto akumulovanou energii lze do náhradního schéma zavést jako kapacitor. Impedance kapacitoru je nepřímo úměrně závislá na frekvenci, a proto lze její vliv při nízkých frekvencích zanedbat. Při vyšších frekvencích se vlivem snižující se impedance začíná část proudu uzavírat přes tyto kapacitory a tím se množství přenesené energie snižuje. [12]

Parazitní kapacity se projevují mezi vinutími a jádrem, mezi závity jedné cívky, ale také mezi oběma vinutími, mezi vinutími a zemí atd. Konkrétní hodnoty jsou závislé na geometrických parametrech transformátoru. [11]

Pro účely této práce byl zvolen model se třemi kapacitami ve tvaru π -článku.



Obrázek 2. 8 Náhradní schéma transformátoru platné pro vysoké frekvence [11]

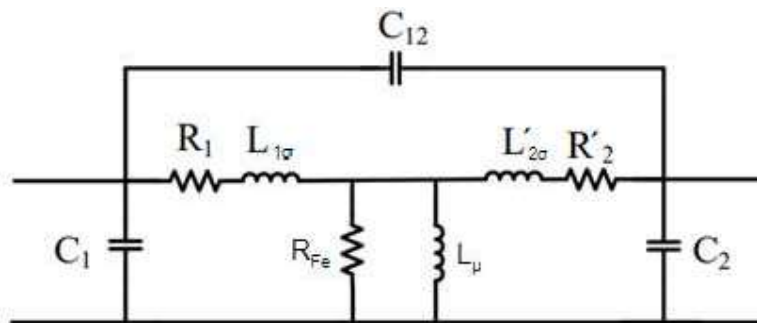
I zde, stejně jako u nízkofrekvenčního schéma, je pro určité zjednodušení možné jednotlivé prvky přepočítat na jednu stranu – v tomto případě na primární stranu. Vztahy pro převod jsou uvedeny v kapitole 1.4. Pro kapacity platí následující převodní rovnice.

$$C_1 = C_{1o} + (1 - k)C_{12o} \quad (2.18)$$

$$C_2 = k^2 C_{2o} + k(k - 1)C_{12o} \quad (2.19)$$

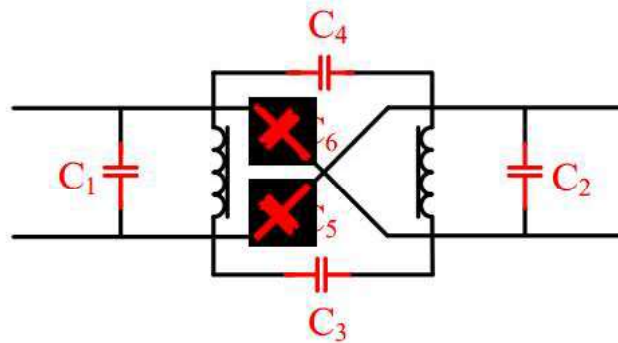
$$C_{12} = kC_{12o} \quad (2.20)$$

Výsledné schéma je patrné na obrázku 2.9.



Obrázek 2. 9 Náhradní schéma transformátoru platné pro vysoké frekvence s přepočítanými veličinami

Kromě výše uvedeného schéma lze také vytvořit model se šesti kapacitami.



Obrázek 2. 10 Model se šesti kapacitami [12]

3 Metodika získávání parametrů pro vysokofrekvenční model

Pro stanovení parametrů je možné vycházet z měření nakrátko a naprázdno při nízké frekvenci – odpory vinutí, rozptylové reaktance vinutí a magnetizační reaktance jsou tedy již známy a stačí provést měření pro stanovení kapacit.

3.1 Frequency response analysis (FRA)

Jedná se o citlivou diagnostickou metodu, která spočívá v měření impedancí/ admitancí v závislosti na frekvenci. Na základě této charakteristiky lze analyzovat stav transformátoru a objevit případné poruchy. Vyhodnocení charakteristiky se provádí porovnáním s dřívějším měřením, či s ostatními fázemi transformátoru. [16]

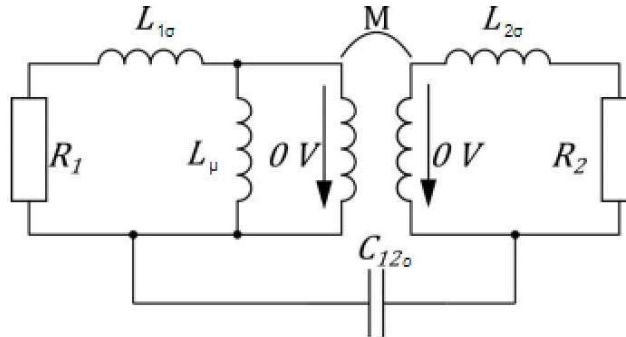
Jak již bylo popsáno výše, náhradní schéma transformátoru představuje komplexní RLC obvod. To znamená, že při měření frekvenční odezvy se objeví také frekvence, pro které nastane v obvodu rezonance. Počet těchto rezonančních frekvencí závisí na designu a konstrukci transformátoru. [16] Pro rezonanci platí Thomsonův vztah.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Správným vyhodnocením rezonanční frekvence je možné stanovit parazitní kapacity náhradního schématu.

3.2 Stanovení kapacity mezi vinutími

Při tomto měření je jak primární, tak sekundární strana transformátoru spojena do krátka. Jelikož se zkratovaná vinutí na přenosu energie nijak nepodílí, lze rovnou stanovit kapacitu C_{12o} . [15]



Obrázek 3. 1 Měření kapacity mezi vinutími [15]

Pro měření lze použít Ohmovu metodu. Nejprve je stanovena impedance kapacitoru jako poměr napětí a proudů.

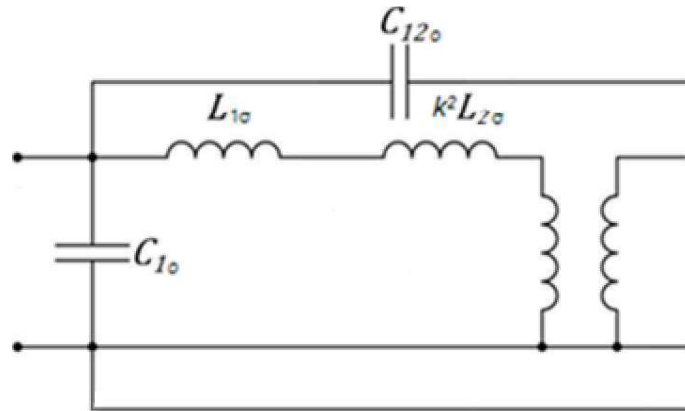
$$X_C = \frac{U}{I} \quad (3.2)$$

Z impedance se poté stanoví hodnota kapacity.

$$C_{12o} = \frac{1}{\omega X_C} \quad (3.3)$$

3.3 Stanovení mezizávitových kapacit

Pro měření mezizávitové kapacity primárního vinutí je sekundární vinutí spojeno do krátka. Stejně jako při nízkofrekvenčním měření lze vliv příčné větve zanedbat. Náhradní schéma vypadá takto:

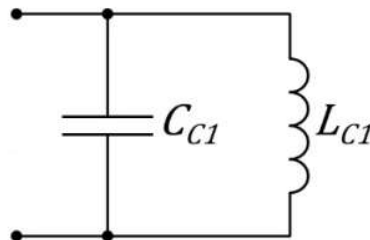


Obrázek 3. 2 Měření primární mezizávitové kapacity [15]

Odpor vinutí lze zanedbat, jelikož při vysokých frekvencích je mnohem menší v porovnání s impedancí cívky. Schéma lze ještě zjednodušit sloučením prvků:

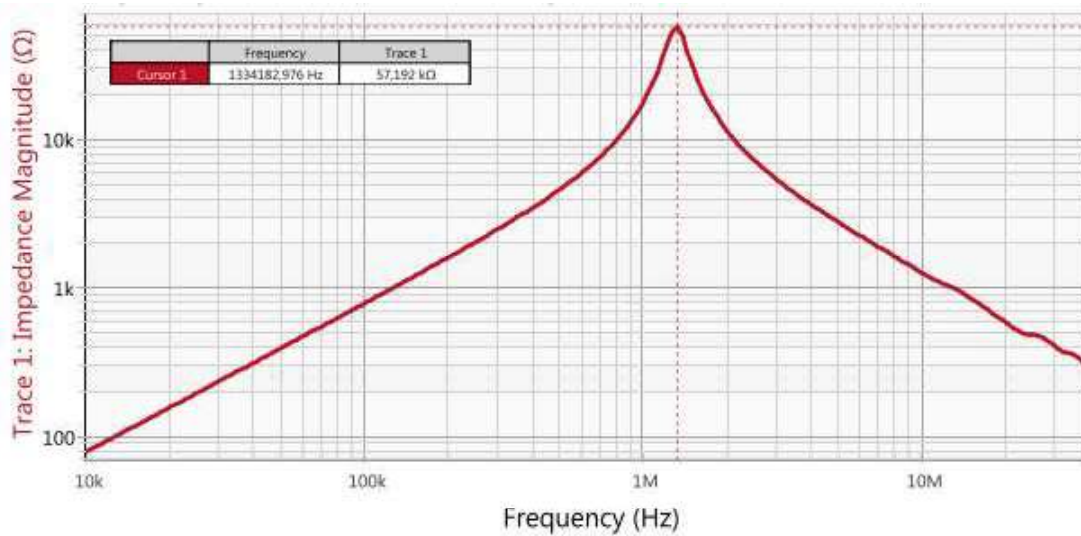
$$C_{C1} = C_{10} + C_{120} \quad (3.4)$$

$$L_{C1} = L_{1\sigma} + k^2 L_{2\sigma} \quad (3.5)$$



Obrázek 3. 3 Zjednodušené schéma měření primární mezizávitové kapacity

Měřením frekvenční závislosti celkové impedance tohoto zapojení lze stanovit frekvenci, pro kterou jsou prvky L_{C1} a C_{C1} v paralelní rezonanci. Paralelní rezonance se projevuje v ideálním případě jako rozpojený obvod, impedance je tedy nekonečně velká. Reálně se paralelní rezonance projeví prudkým nárůstem impedance.



Obrázek 3. 4 Frekvenční závislost impedance nakrátko měřená na primární straně [15]

Pro rezonanci platí vztah 3.1, z tohoto vztahu se vyjádří kapacita

$$C_{C1} = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{C1}} \quad (3.6)$$

Kapacita C_{1o} se poté dopočítá jako:

$$C_{1o} = C_{C1} - C_{12o} \quad (3.7)$$

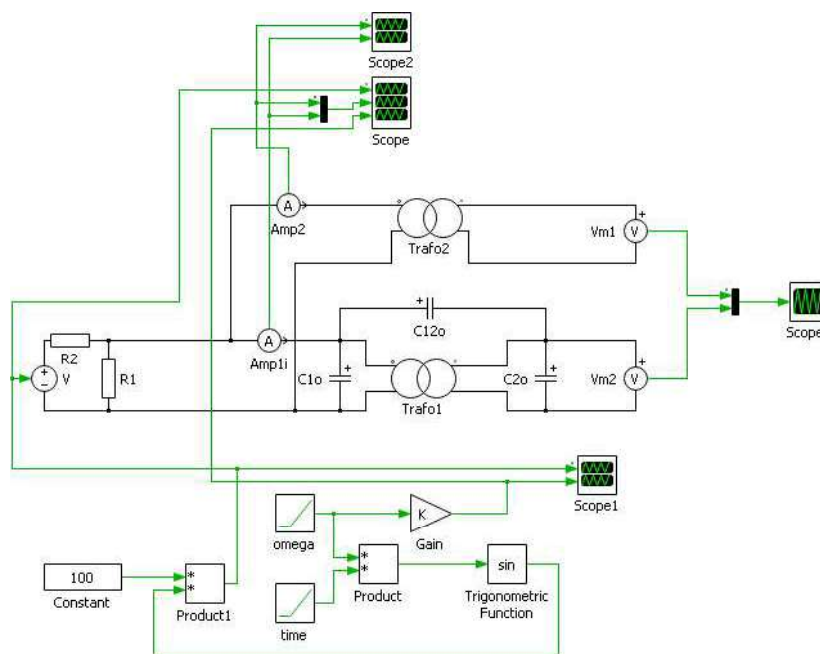
Obdobně se postupuje také na sekundární straně.

4 Simulace modelu

Postup pro určení kapacit náhradního schématu byl prověřen simulacemi pomocí softwarového nástroje PLECS, který je doplňkem pro Simulink.

4.1 Porovnání dvou modelů

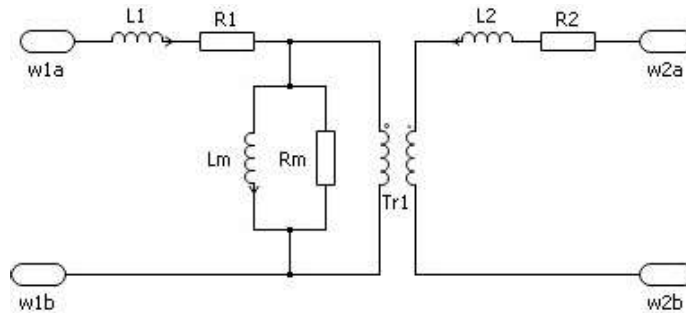
Nejprve jsou porovnány dva modely transformátoru. Jeden model je rozšířen o parazitní kapacity, druhý je uvažován pouze jako nízkofrekvenční. Na obrázku 4.1 je patrné schéma simulace.



Obrázek 4. 1 Schéma simulace pro porovnání dvou transformátorů

Všechny součástky jsou uvažovány jako ideální, což představuje problém, jelikož se zde objevuje ideální kapacitor připojený paralelně k ideálnímu zdroji napětí. Takové spojení není možné, jelikož by v tomto případě docházelo ke skokové změně napětí, a tedy i energie. Tento problém je vyřešen přidáním odporů R_1 a R_2 , které představují vnitřní odpor zdroje napětí.

Vnitřní struktura samotného transformátoru je následující:



Obrázek 4. 2 Vnitřní struktura transformátoru

Jedná se o náhradní schéma ve tvaru T-článku, které bylo popsáno podrobněji v 2. kapitole. V podélné větvi se nacházejí odpory vinutí a rozptylové reaktance, v příčné větvi magnetizační reaktance a odpor respektující ztráty v železe. Toto schéma není přepočítané na jednu stranu, proto je zde naznačen ideální převod.

Jsou zvoleny hodnoty:

$$L_1 = 10 \text{ mH}$$

$$L_2 = 0.1 \text{ mH}$$

$$R_1 = 10 \ \Omega$$

$$R_2 = 0.1 \ \Omega$$

$$L_m = 1 \text{ H}$$

$$R_m = \text{inf}$$

$$k = 10$$

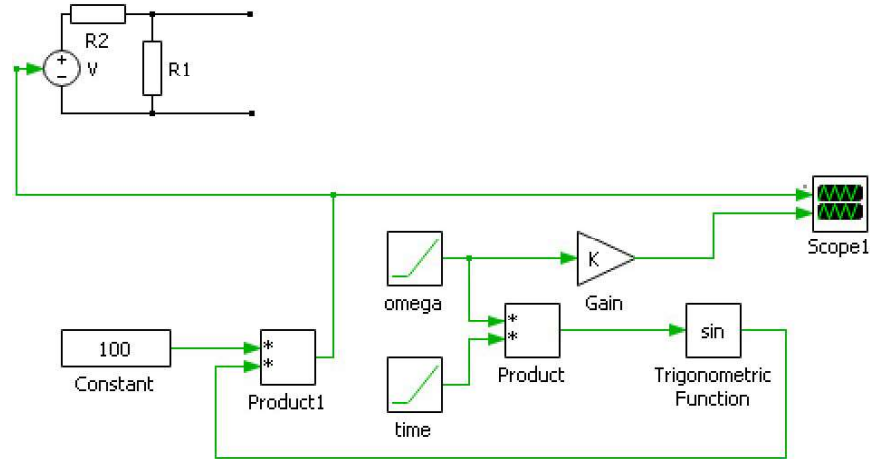
Pro vysokofrekvenční model jsou navíc uvažovány kapacity:

$$C_{1o} = 100 \text{ pF}$$

$$C_{2o} = 100 \text{ pF}$$

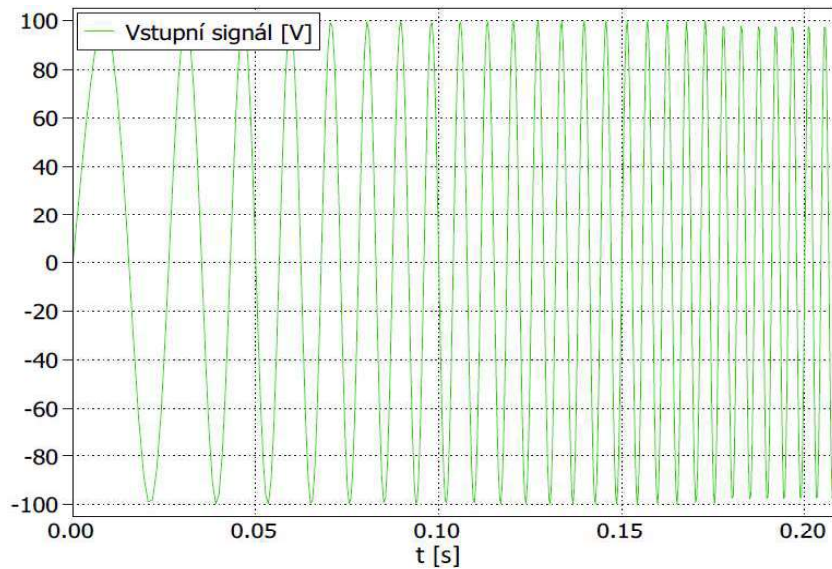
$$C_{12o} = 100 \text{ pF}$$

Zdroj je řízen blokem, který generuje sinusový signál o amplitudě 100 V. Pro měření naprázdno je důležité pohybovat se v lineární části magnetizační charakteristiky, aby nebyl transformátor přesycován. Argument sinusové funkce je řízen blokem, který zajišťuje lineární nárůst frekvence v čase.



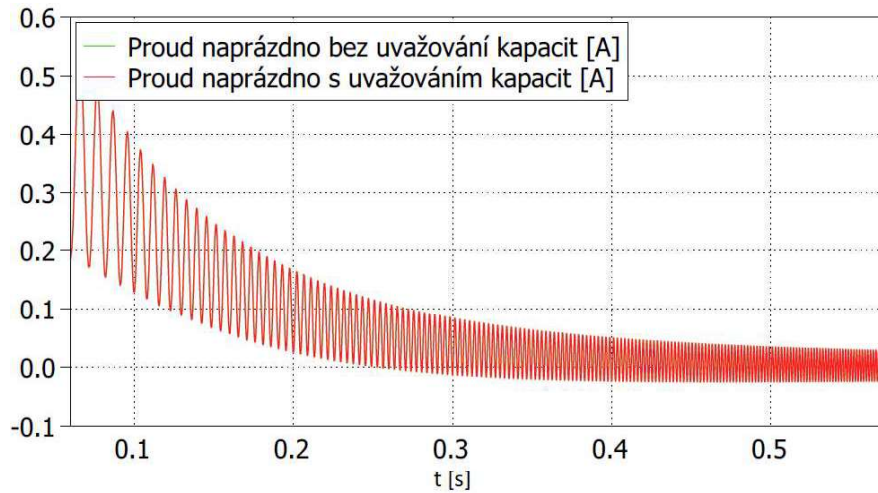
Obrázek 4. 3 Řízení vstupního signálu

Vstupní signál je zobrazen na obrázku 4. 4.



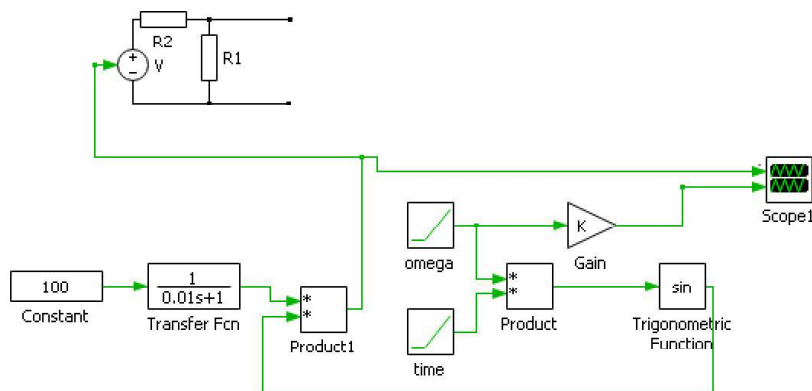
Obrázek 4. 4 Průběh napětí zdroje

Průběh proudu naprázdno obou transformátorů je pak zobrazen na následujícím grafu. Zobrazen je úsek 50–300 Hz.

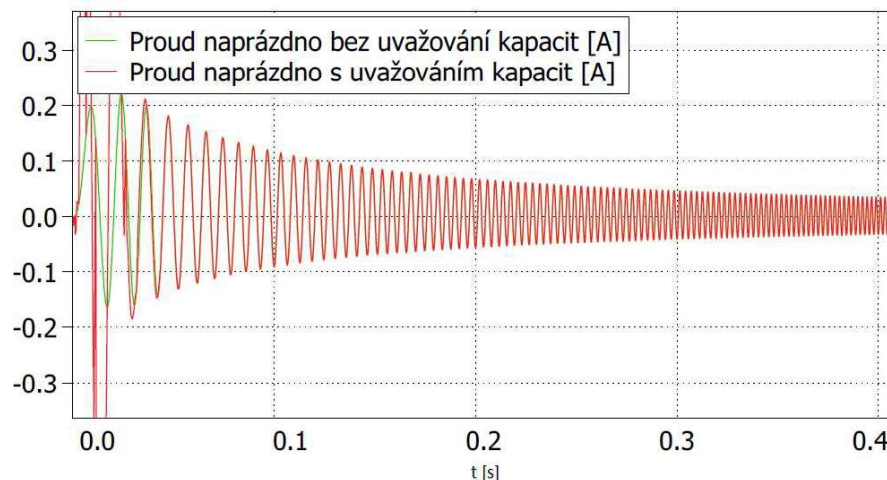


Obrázek 4. 5 Průběh proudů naprázdno (50-300 Hz)

Z průběhu proudu je patrné, že zpočátku dochází k přesycení jádra, a proto je nutné průběh napětí upravit tak, aby jeho amplituda pozvolně rostla až k maximální hodnotě.

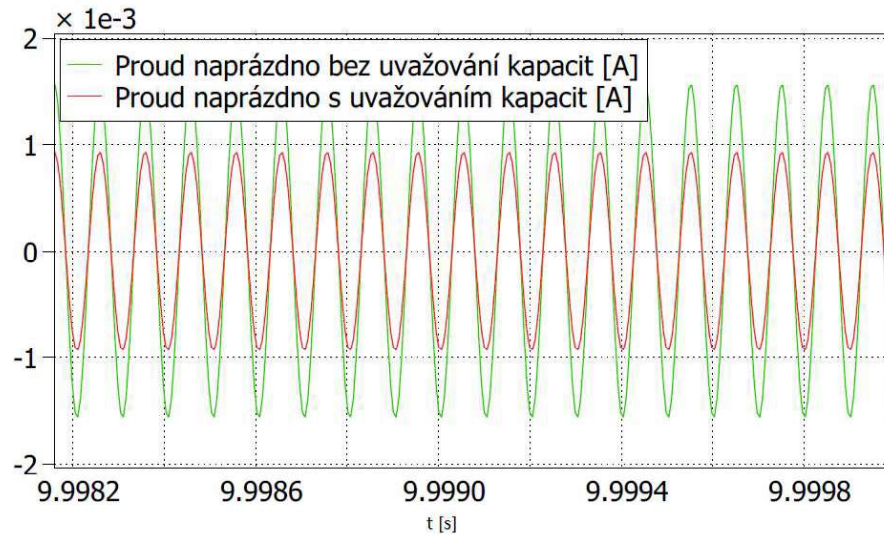


Obrázek 4. 6 Úprava řídicího signálu



Obrázek 4. 7 Průběh proudů naprázdno po úpravě řídicího signálu (50–300 Hz)

Průběh proudu bez uvažování parazitních kapacit je znázorněn zeleně, průběh proudu s uvažováním parazitních kapacit je znázorněn červeně. Počáteční deformovaný průběh červené křivky je způsoben přechodovým dějem. Velikost proudu přirozeně s rostoucí frekvencí klesá, jelikož s frekvencí roste impedance cívek. Z grafu je patrné, že pro nízké frekvence průběhy proudů splývají a jsou totožné, nicméně při vyšších frekvencích začíná být patrný rozdíl obou průběhů.

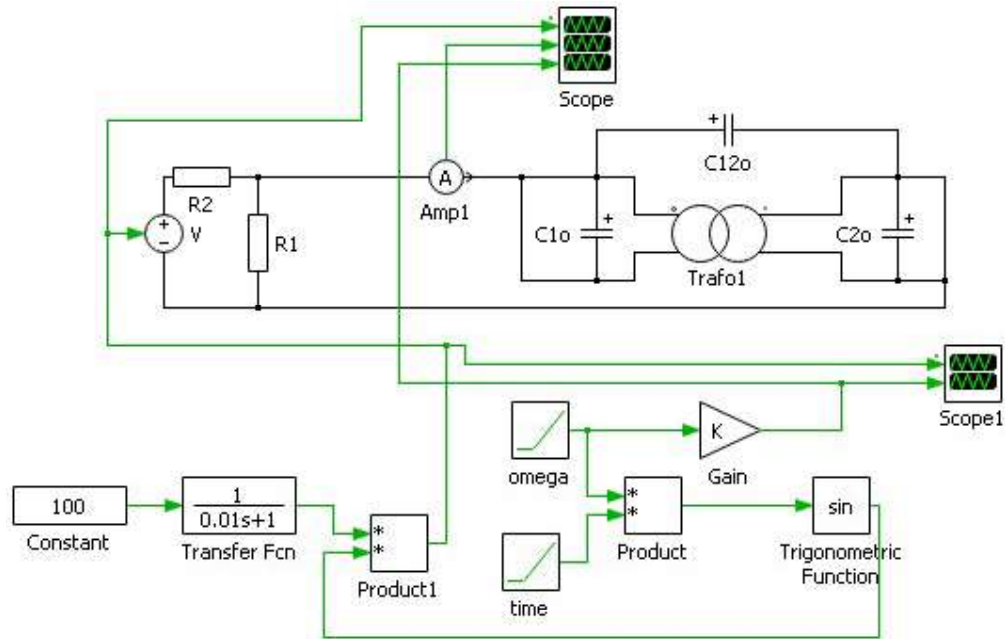


Obrázek 4. 8 Průběh proudů naprázdno (5049-5050 Hz)

Lze tedy potvrdit, že při nízkých frekvencích je vliv parazitních kapacit zanedbatelný.

4.2 Měření kapacity mezi vinutími

Pro stanovení kapacity C_{120} je obvod spojen podle obrázku 3.1. Proud se nyní může uzavírat pouze přes kapacitor C_{120} a tak lze jednoduše stanovit jeho kapacitu Ohmovo metodou, resp. aplikací vztahů 3. 2 a 3. 3.



Obrázek 4. 9 Měření kapacity mezi vinutími

Hodnoty byly odečteny při frekvenci 20 kHz.

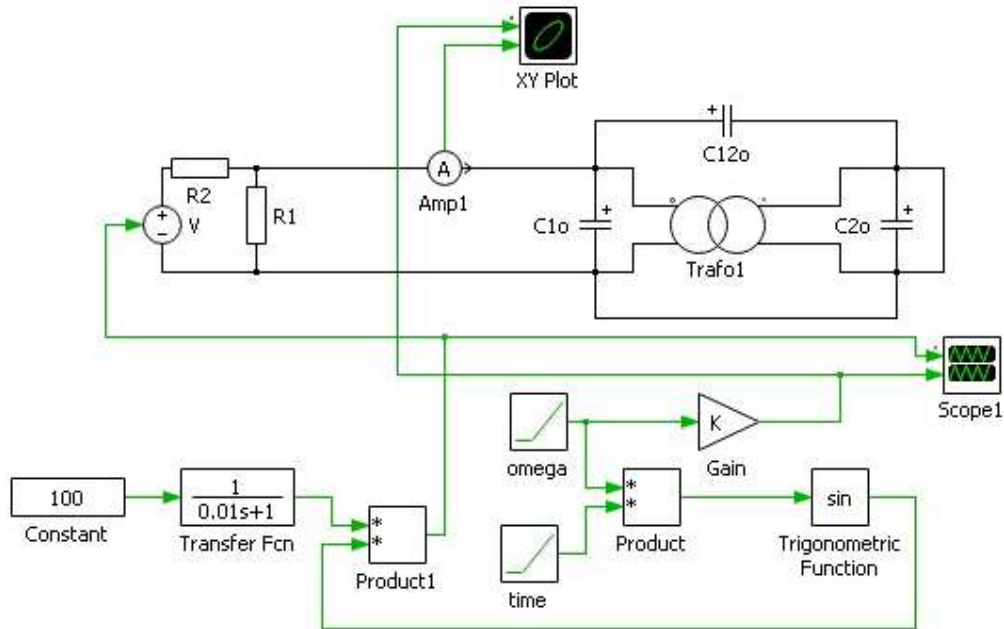
$$X_C = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,001264} = 79113,92 \Omega$$

$$C_{120} = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 20000 \times 79113,92} = 100,59 \text{ pF}$$

Dopočítaná hodnota odpovídá zvolené hodnotě kapacity.

4.3 Měření mezizávitových kapacit

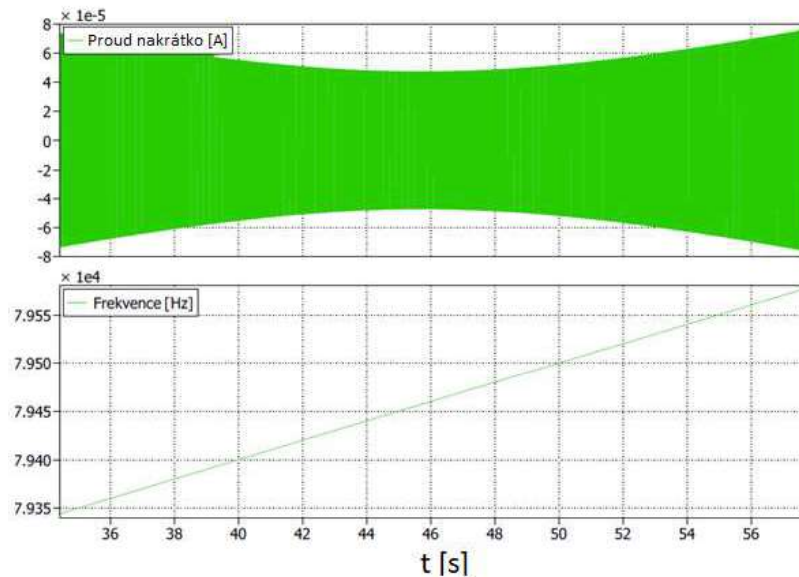
Vzhledem k tomu, že byly zvoleny shodné mezizávitové kapacity, je provedeno měření pouze na jedné straně. Svorky sekundárního vinutí jsou spojeny dokrátka. Dále jsou dokrátka propojeny svorka primárního a svorka sekundárního vinutí.



Podle vztahu 3.1 je spočítána předpokládaná rezonanční frekvence:

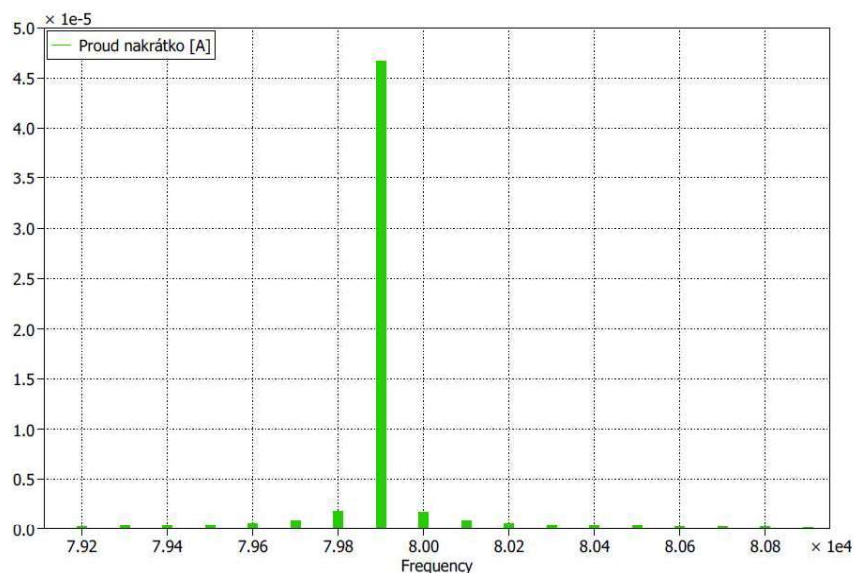
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{C1}C_{C1}}} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{0,02 \times 200 \times 10^{-12}}} = 79577,47 \text{ Hz}$$

Je sledován průběh proudu v závislosti na frekvenci. Pro paralelní rezonanci platí, že impedance je maximální a procházející proud minimální.



Obrázek 4. 10 Proud nakrátko v závislosti na frekvenci

Podle grafu na Obrázku 4. 10 by se mohlo zdát, že k rezonanci dochází přibližně pro frekvenci 79452 Hz, nicméně skutečná rezonanční frekvence je odlišná. Je tomu tak proto, že frekvence není konstantní, ale lineárně s časem narůstá. Skutečná frekvence zdroje pak závisí také na rychlosti, se kterou se frekvence mění. Pro podrobnější analýzu naměřeného proudu v rezonanci je tak nutné signál rozložit pomocí Fourierovy transformace.



Obrázek 4. 11 Fourierova transformace signálu

Na základě Fourierovy transformace byla stanovena rezonanční frekvence 79900 Hz. Z této hodnoty je dále dopočítána kapacita C_{C1} .

$$C_{C1} = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{C1}} = \frac{1}{(2 \times \pi \times 79900)^2 \times 0,02} = 198,39 \text{ pF}$$

A následně již lze určit i C_{10} .

$$C_{10} = C_{C1} - C_{12o} = 198,39 \times 10^{-12} - 100,59 \times 10^{-12} = 97,8 \text{ pF}$$

Tato hodnota odpovídá předem stanovené hodnotě mezizávitové kapacity.

Závěr

Měřením nakrátko a naprázdno lze rychle a jednoduše stanovit parametry nízkofrekvenčního náhradního schématu, takové schéma je ale neodpovídá chování transformátoru při vysokých frekvencích. Aby náhradní schéma bylo platné i pro vysoké frekvence, je nutné přidat do schématu kapacitory. To lze provést více způsoby. V této práci byly zvoleny 3 kapacitory ve tvaru π -článku.

Pro stanovení kapacity mezi vinutími byla použita Ohmova metoda a pro stanovení mezizávitové kapacity byla použita metoda analýzy frekvenční odezvy. Při takovém měření je nutné nelézt rezonanční frekvenci, pro kterou lze mezizávitovou kapacitu určit použitím Thomsonova vztahu. Nevýhoda takové metody může spočívat v tom, že rezonanční frekvence může být velmi vysoká, a tedy obtížně změřitelná. Tento postup byl následně ověřen simulací. Všechny dopočítané hodnoty kapacit odpovídaly předem stanoveným hodnotám.

Pro přesnější stanovení parametrů je nutné, aby byly při výpočtech brány v úvahu také rostoucí ztráty, které jsou frekvenčně závislé a nelinearita jádra transformátoru vlivem sycení. Reálně se také u všech pasivních prvků projevují při velmi vysokých frekvencích parazitní elementy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav a spol. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 140 s. ISBN 80-7043-444-9
- [2] DEL VECCHIO, Robert M. *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers*. 2002. ISBN 9789056997038. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&an=154527&scope=site>
- [3] *Real Transformer On Load Condition* [online]. Dostupné z: <https://www.eeeguide.com/real-transformer-on-load-condition/>. Viděno 20. květen 2021.
- [4] *Transformátor - základní vlastnosti a dělení*. [online] oEnergetice.cz, duben, 15:20 2015, dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/>.
- [5] *Experimental study and comparative analysis of transformer harmonic behaviour under linear and nonlinear load conditions* - Scientific Figure on ResearchGate. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/The-equivalent-circuit-of-the-single-phase-transformer_fig7_224241707 [accessed 17 Apr, 2021]
- [6] SKALA, Bohumil. *Elektrické stroje* [přednáška]. Plzeň: Západočeská univerzita 2020.
- [7] *An online parameter monitoring method for power transformers based on DEA - Scientific Figure on ResearchGate*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Simplified-equivalent-circuit-of-the-single-phase-transformer-Here-equation-10-and_fig4_254030862 [cit. 18 Apr, 2021]
- [8] *Open circuit and short circuit test on transformer* [online]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/open-circuit-and-short-circuit-test-on-transformer/>.
- [9] BARTOŠ, Václav a SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 110 s. ISBN 80-7082-447-3.
- [10] SKALA, Bohumil. *Teorie elektrických strojů 1* [přednáška]. Plzeň: Západočeská univerzita 2020
- [11] LU Hai Yan, ZHU Jian Guo a HUI S. Y. R. *Experimental determination of stray capacitances in high frequency transformers*. in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 5, pp. 1105-1112, Sept. 2003, doi: 10.1109/TPEL.2003.816186.
- [12] HADIZADE A., NASAB J. N. et al. *Investigations on equivalent circuit models of high frequency transformers*. 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2018, pp. 475-480, doi: 10.1109/PEDSTC.2018.8343843.
- [13] DOLEŽEL, Ivo. *Teorie elektromagnetického pole* [přednáška]. Plzeň: Západočeská univerzita 2020
- [14] *Základy elektrotechniky* [online]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>. Viděno 6. květen 2021.
- [15] BITSCHNAU, Martin. *Transformer modelling* [online]. OMICRON Lab 2017. Dostupné z: https://www.omicron-lab.com/fileadmin/assets/Bode_100/ApplicationNotes/Transformer_modelling/App_Note_Transformer_modelling_V_2_0.pdf
- [16] *IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers* [online]. in IEEE Std C57.149-2012, vol., no., pp.1-72, 8 March 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.64759